

13/88

وزارة التعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

25X

## ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT " MINES ET METALLURGIE "

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### S U J E T

ETUDE ET REALISATION D'UN  
MODELE DE CONVERTISSEUR  
(L-D) AERODYNAMIQUE.

Proposé par :

M. KARPATI

Etudié par :

H-Y. TFYECHÉ  
H. BENNABI

Dirigé par :

M. KARPATI

PROMOTION : 1988 - JANVIER

— Remerciements —

Nous tenons à remercier tous les enseignants et responsables du département "Mines et Métallurgie" pour leurs aimable concours et précieuse aide pendant toute la durée de nos travaux.

Nous remercions en particulier notre promoteur M<sup>re</sup> KARPATI pour son inestimable assistance et ses nombreux encouragements qui ont contribué efficacement à l'aboutissement de nos travaux.

Nos remerciements vont également à M<sup>re</sup> Rachid, technicien au sein du département de Mécanique, pour sa collaboration dans la partie pratique, et à M<sup>re</sup> Touafri qui n'a pas hésité à nous prêter main-forte en s'occupant de l'imprimerie de l'ouvrage.

— Dédicace —

- A la mémoire de mon grand père " CHIKH TFYECHÉ "

- A mes parents.

- A mes frères et Soeurs

- A tous ceux qui me sont chers je dédie ce modeste travail

" HADJ YUCEF "

- A mes parents, à mon frère et mes soeurs, ainsi qu'à tous mes amis je dédie mon travail

" HOCINE "

Introduction . . . . .	1
<u>Chapitre I</u>	
- Généralités . . . . .	2
- Convertisseur . . . . .	2
- Matière première . . . . .	7
- Bilan de matière et thermique du procédé L.D . . . . .	9
<u>Chapitre II</u>	
- Hydrodynamique du jet de gaz . . . . .	15
- Etude cinétique du jet de gaz . . . . .	18
- Etude des influences du jet de gaz . . . . .	21
<u>Chapitre III</u>	
- Macrographie du processus . . . . .	21
<u>Chapitre IV</u>	
- Marche générale de l'affinage . . . . .	24
<u>Chapitre V</u>	
- Théorie de changement de concentration . . . . .	30
<u>Chapitre VI</u>	
- Construction du modèle . . . . .	35
<u>Chapitre VII</u>	
- Détermination des principaux paramètres de la buse Laval à l'aide des lois aérodynamiques . . . . .	39
- Application des lois aérodynamiques pour la réalisation de la buse Laval . . . . .	44
<u>Chapitre VIII</u>	
- Etude du processus hydrodynamique . . . . .	47
- Conclusion . . . . .	58



## // INTRODUCTION

L'oxygène présente, par rapport à l'air, le grand avantage de n'être pas dilué par de l'azote. Aussi on en attendait logiquement des gains aussi bien du point de vue thermique qu'au point de vue qualité (teneur faible en azote).

Cependant les procédés classiques, avaient été conçus en vue de l'utilisation d'air comme agent carburant et, très vite il est apparu que tels quels, il ne pouvaient pas s'adapter à l'oxygène pur (cas du convertisseur Bessemer ou Thomas dont le fonds ne convient absolument pas au soufflage d'oxygène pur). Il est donc normal qu'on ait cherché à mettre au point des procédés originaux spécialement conçus pour l'oxygène pur.

Et c'est tout juste après la Deuxième guerre mondiale, que les Autrichiens trop inquiets quand au sort du développement de leur production d'acier (vue que les minerais de fer Autrichiens conduisent à une fonte de type hématite, avec une teneur en phosphore de l'ordre de 0,15 %, et sachant qu'une telle teneur est trop élevée pour le procédé BESSEMER dont le garnissage acide ne permet aucune déphosphoration, et beaucoup trop basse pour le procédé Thomas en garnissage basique) voulurent mettre au point un nouvel procédé adaptable à leur fonte hématite.

Ce fut en 1948, que le professeur DURRER réussit et pour la première fois à avoir de bon résultats après des essais d'affinage à l'oxygène pour soufflé, à la lance ~~des~~ un convertisseur BESSEMER de 2,5 Tonne.  
~~dans~~

Après cela, les Autrichiens se sont lancés résolument dans la voie tracée par ces essais, jusqu'à ce qu'ils aboutissent à la construction de deux aciéries entièrement nouvelles, l'aciérie de LINZ en 1952 et celle de DONAWITZ en 1953.

Ce procédé fut par la suite universellement connu, et appelé convertisseur L.D.

GENERALITES1. CONVERTISSEURS

1.1. FORME : La figure représente une coupe verticale du convertisseur de 140 t de l'acierie USINOR à Dunkerque ( FRANCE)

Le tracé des convertisseurs à l'oxygène de type LD a donné lieu à un certain nombre de théories destinées à définir les règles générales qu'ils convenait de respecter, mais il apparait que le problème est encore loin d'être résolu.

La définition d'un tracé optimale doit tenir compte :

- des conditions métallurgiques lors de l'affinage
- des conditions thermiques
- des conditions d'usure du garnissage
- des conditions de coulée

Actuellement ; on considère que les caractéristiques suivantes représentent pour l'affinage de fonte hématisée un bon compromis des différentes conditions précédemment énumérées.

- volume intérieur : 0, 8 m<sup>3</sup>/t.
- rapport hauteur/diamètre : 1,2
- Diamètre de bec : faible et fonction des impératifs de chargements.

1.20 REALISATIONS TECHNOLOGIQUES :

Le convertisseur et son support doivent pouvoir accepter, en service de longue durée, les contraintes d'ordres mécanique et thermiques dont la sévérité croît avec la dimension de l'appareil.

tendance à l'emploi de plus en plus fréquente d'aciers soudables à haute résistance au lieu des aciers courants pour tôles.

la zone du bec est de tenue délicate, ce qui a amené certaines usines, à prévoir la partie inférieure conique démontable.

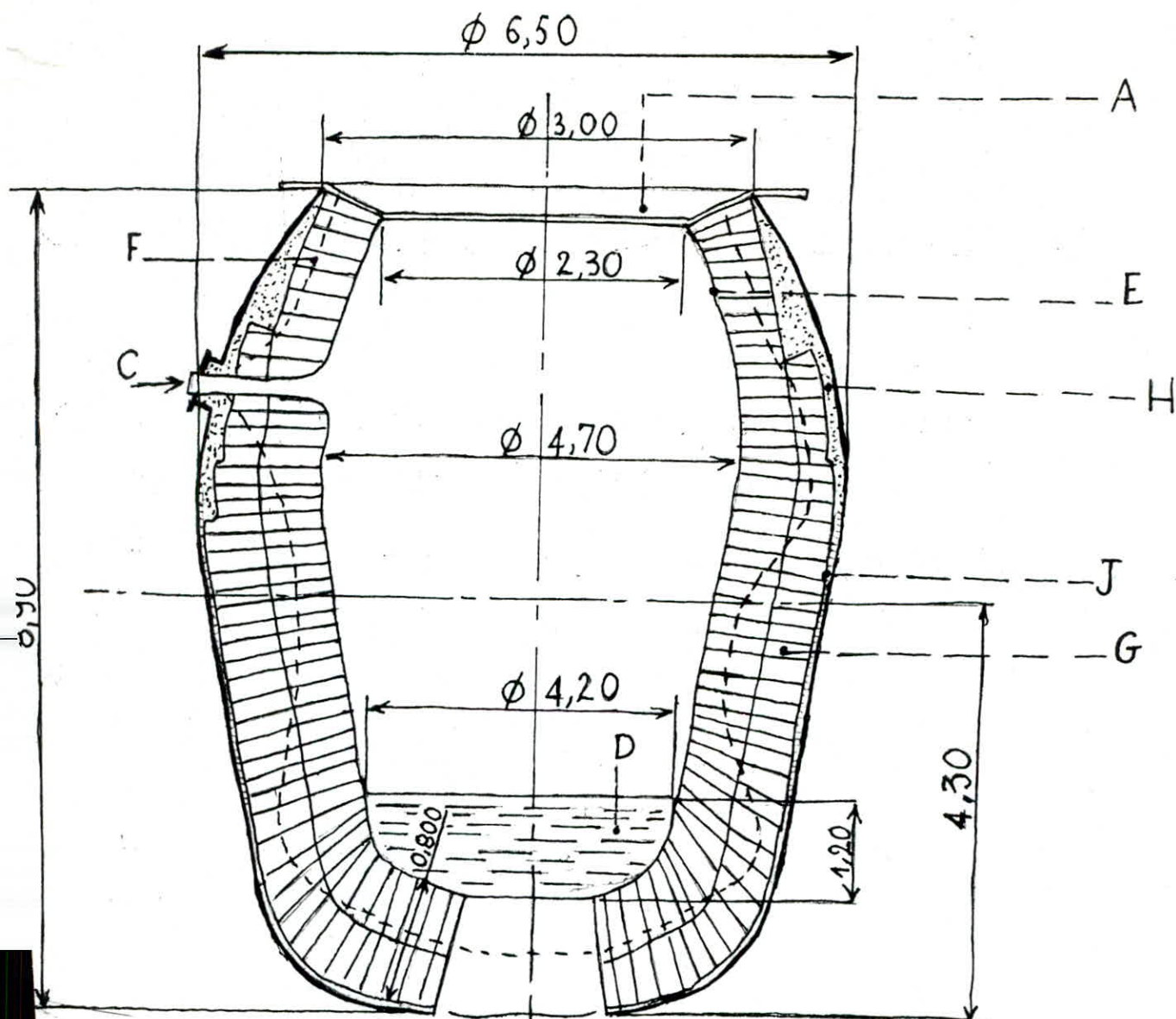
Le convertisseur peut également comporter un fond démontable pour assurer un refroidissement plus rapide du garnissage usé.

1.21 MECANISME DE BASCULEMENT

d'une façon générale, le couple de rappel est tel, qu'en cas de panne, il tend à ramener le convertisseur dans la position verticale, bec en haut, les systèmes hydrauliques à crémaillères et pignons, employés pour les anciens convertisseurs, ne sont plus envisageables au delà d'une certaine capacité de convertisseur ( de l'ordre de (ø 50 t).

.../...





(1) Coupe verticale d'un convertisseur de 140t de l'aciérie d'USINOR (Dunkerque)

A : bec du convertisseur.

C : trou de coulée.

D : bain.

E : Profil du garnissage neuf.

F : Profil d'usure du garnissage.

G : briques de dolomies

H : pisé dolomique.

J : plaque <sup>de</sup> He<sup>v</sup> magnésie



d'une façon générale, en s'est dirigé vers l'emploi de moteur électriques, en cherchant à respecter les conditions suivantes :

- Obtention de plusieurs vitesses de basculement dont au moins une lente (environ 0,1 t/mn )
- utilisation de plusieurs moteurs, soit alternativement, soit simultanément, de façon que chacun de ces moteurs soit capable d'entraîner la cornue à lui seul.

### LANCES

Lalance du convertisseur L D , étant soumise à des conditions de travail particulièrement sévères, doit faire l'objet d'une attention toute particulière, aussi bien dans son dessin que dans sa construction et son montage.

### TEPE DE LANCE.

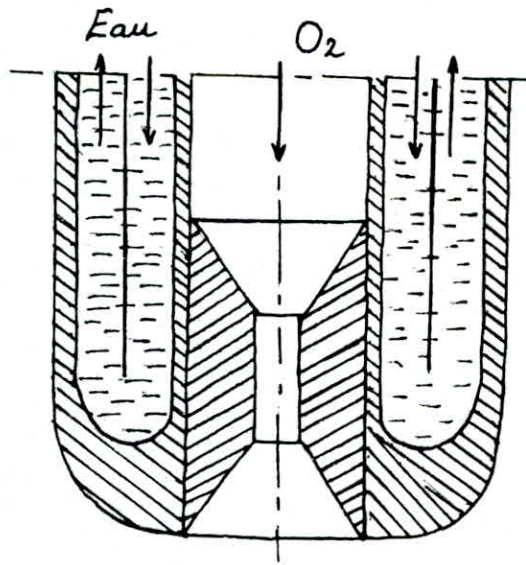
A la partie supérieure de la lance, un ensemble communément appelé tfe de lance comporte les divers piquages d'alimentation (circuits d'oxygène, et d'eau), les dispositifs de suspension de la lance, ainsi que les liaisons entre les divers tubes.

### CORPS DE LANCE

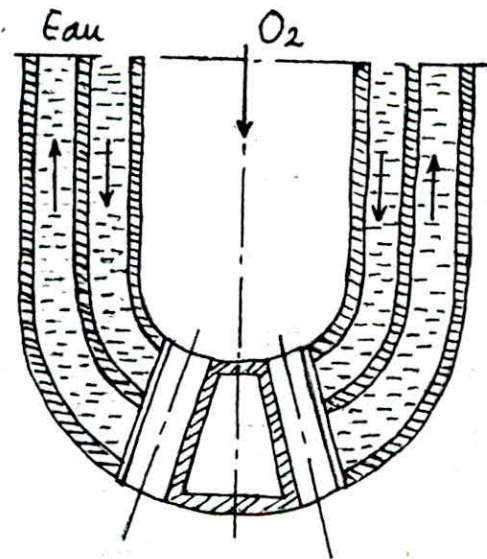
Le corps de lance est composé d'une série de tubes concentriques ( au minimum 3 ) dont l'ecourtoment est maintenu par des entre-toises. deux des ( réservoirs ) espaces annulaires ainsi réservés servent à la circulation de l'eau de refroidissement de la lance, dont le retour s'effectue en règle général par l'espace annulaire situé le plus à l'extérieur. La légère conicité constitue une amélioration récente et facilite le décrochage des lous causés par les projections lors de l'élaboration.

### BUSE ~~D'INSUFFISANCE~~ D'INSUFFLATION

Les conditions de travail de la buse sont très sévères (atmosphère à haute T°, rayonnement du bain et des parois , projections de métal liquide), cette buse est en générale réalisée en cuivre. La buse est rapporté sur le tube extérieur du corps de lance par soudure.



buse de lance à jet simple (un trou)



Exemple de lance à trous multiples  
(ici trois trous)

figure (2)

Le refroidissement est assuré par des débits d'eau élevés (40 à 50 m<sup>3</sup>/h pour un convertisseur de 30 t).

#### LANCE A JET SIMPLE :

Dans les premières années du procédé L D , seules étaient utilisées en pratique les buses droites ou a venturi convergent - divergent (fig 2) elles étaient calculés pour un même débit d'oxygène du point de vue aérodynamique, ces buses se caractérisent par des jets d'impulsions élevés, avec une répartition très hétérogène des pressions dynamiques : celles-ci sont fortes dans l'axe du jet, mais diminuent très rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'axe, ces caractéristiques se traduisent en pratique par un grand pouvoir pénétrant du jet sur une surface d'impact assez restreinte.

#### MATIERES PREMIERES

##### FONTE

La fonte traitée au convertisseur L D est une fonte hématite caractérisée par une teneur en phosphore de l'ordre de 0,15% , a un maximum d'environ 0,40%. Au delà de cette teneur des difficultés peuvent se présenter quand à l'obtention des nuances d'acier désirées.

La teneur moyenne en silicium visée dans la fonte varie suivant les usines : du seul point de vue de l'élaboration proprement dite, l'optimum parait être de 0,6% . Il en est de même pour la teneur en soufre qui fluctue selon les conditions d'élaboration quand à la teneur en manganèse qui dépend essentiellement de la nature du lit de fusion, elle peut être très différentes d'une usine à l'autre. Il faut noter que la température de la fonte à l'enfournement est de l'ordre de 1300 C°.

( pour le tracé de l'évolution des éléments de la fonte).

(voir fig. 28)

##### FERRAILLES :

Les additions refroidissantes sont composées de Ferrailles représentant environ 30% de l'enfournement total.

##### MINERAIS DE FER :

L'addition de minerai est effectuée à titre complémentaires pour faciliter le réglage de le T° finale.



FONDANTS :

Le laitier avait du mal à se former, c'est pourquoi on accéléré cette formation par additions d'agents fluidifiants , généralement bauxite, pailles de laminoirs etc.....

CHAUX :

La chaux qu'on utilisè doit être controlée aussi bien du point de vue granulométrie que du point de vue composition chimique.

OXYGENE

Le degré de pureté de l'oxygène est en général élevé de l'ordre de 99 % car la teneur en azote de l'acier final est très sensible à ce degré de pureté.

La pression d'utilisation est forte : de l'ordre de 10 KG/cm<sup>2</sup>  
( 10 bar).

Le débit varie bien sûr avec la capacité du convertisseur.



## BILANS DE MATIERES ET THERMIQUE DU PROCEDE L D

---

Ces bilans qui font l'objet des calculs ci-dessous ont été basés sur les données indiquées au tableau II.

### BILAN DE MATIERES

Compositions du laitier : la quantité de chaux utilisée dans une charge est fonction de la composition de la fonte de départ et aussi de la nuance d'acier visée.

On doit tenir compte aussi de l'usure du garnissage.

La basicité finale est le plus souvent caractérisée simplement par le rapport  $\text{Ca}^0/\text{Si O}_2$ , dont la valeur est en générale de l'ordre de 3 à 4.

La quantité de silice, présente dans le laitier à la fin de l'affinage est directement lié à la teneur en silicium de la fonte traitée, ainsi que de la quantité de silice apportée par les additions (chaux, gangue, du minerai).

quant à l'oxyde de fer, sa teneur est fonction de la teneur en phosphore visée au rabatement final.

### RENDEMENT EN OXYGENE

D'une façon générale, la teneur en oxygène est définie par l'analyse de la fonte, l'analyse de l'acier visé, la teneur en fer et la quantité de laitier final, ainsi que par le taux de combustion secondaire du Co et  $\text{Co}_2$  à l'intérieur du convertisseur. Ce dernier facteur est assez difficile à réaliser ou à définir avec précision, car elle dépend du type de lance utilisée.

Dans l'exemple du tableau II nous avons pris 10% pour la teneur moyenne en cas des fumées à l'intérieur du convertisseur (on avait utilisé pour cela des lances venturées).

BILAN THERMIQUE :

La connaissance du bilan matières d'un affinage donné est la base de l'établissement du bilan thermique correspondant, celui-ci peut être définie dans de bonnes conditions pour le traitement d'un poids donné de fonte. c'est ce qui est réalisé au tableau III.

Sur le tableau , la différence entre les colonnes actif et passif, du bilan représente les calories rendues disponibles par la transformation en acier d'une tonne de fonte. Ces calories représentent d'une part les pertes thermiques en cours d'affinage et d'autre part la réduction d'une certaine quantité d'addition refroidissantes.

Pour notre exemple , nous avons estimé ces pertes à 18 thermies à la tonne de fonte pour un actif de 537,7 th.

La quantité de chaleur disponible pour les additions refroidissante est donc de 101,3 th comme le montre le tableau III elle correspond à 300 Kg de ferrailles et 12 kg de minerai à la tonne de fonte.

Chaque aciérie possède, pour des conditions d'affinage données et avec un type de lance donné ou déterminé, des abaques précisant les variations de poids de ferrailles à ajouter ( à charger) en fonction de deux variables : teneur en silicium et température de la fonte.

.../...

RENDEMENT EN FER

Pertes en fer.

Dans le bilan du tableau II, nous avons distingué deux postes de pertes en fer.

- Pertes par scorification dans le laitier  
(20 % de fer dans 152 Kg de laitier à la tonne de fonte , soit 30 kg de fer).

- Pertes dans les fumées et par étincelles; projections et moussage ( 20 kg de fer).

CALCUL DU RENDEMENT EN FER

il est question du rendement fer sur métal liquide contenu en poche.

FER ACIER EN POCHÉ

---

fer fonte + fer ferrailles + fer Minerai + fer ferraliages

Dans le procédé L D, les valeurs de ce rendement sont maintenant couramment comprises entre 95 et 96 %.

Il convient cependant de bien réaliser l'imprecision de certains postes du bilan fer : le métal liquide en poche est rarement pesé et, s'il l'est, on ne peut connaître le poids du laitier surnageant ; la fonte est elle-même connue avec les imprecisions du laitier surnageant , les ferrailles lorsqu'elles viennent du commerce ont une teneur en fer difficile à déterminer.



TABIEAU II

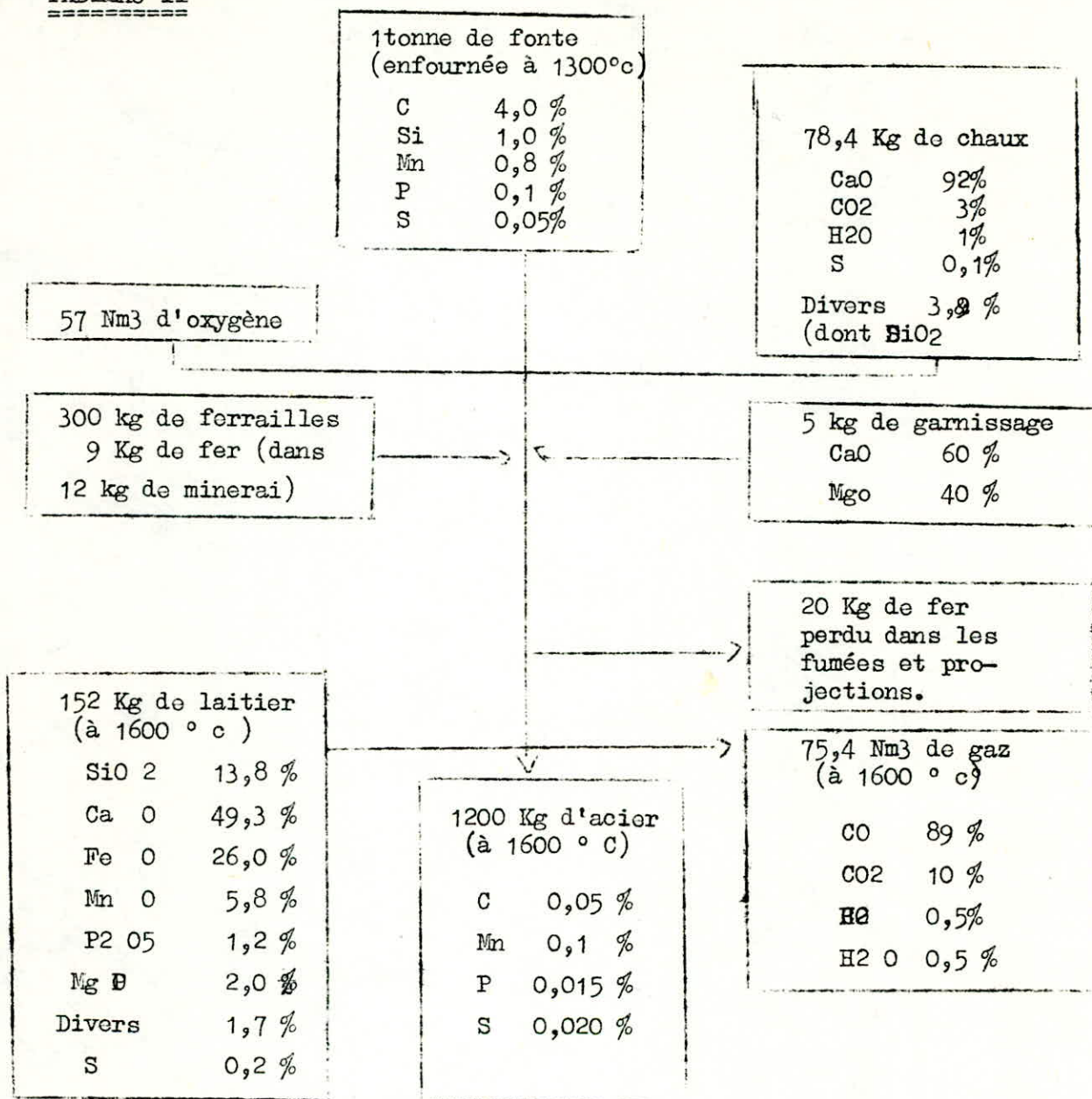




TABLEAU IV

Durée totale en Mn	Durée de soufflage Mn	OPERATIONS	Caractéristiques d'labration
0		Versement de 103,7 t de fonte	
2		Chargement de 41 t de ferrailles	
3		" de 3,9 t de chaux et 1,4 dolonine	
5	0	Début du soufflage	oxygène : 300 Nm <sup>3</sup> /mn Lance: Hauteur de départ h=2,9
7,7	2,7	Première addition de minerai (1,5 t)	
13	8	Addition progressive de chaux (2,6 t)	
20,3	15,3	Seconde addition de minerai (1,4 t)	
24	19	fin de soufflage	
29		Prelevement d'échantillons	Acier C = 0,055 %      Mn = 0,190 % P = 0,014 %      S = 0,017 % T = 159 0° C
		Mensure de température	
35		Arrivée à l'acierie de l'analyse de l'aider coulée en poche de 135,3 t avec addition de ferro manganèse liquide (960 Kg), de manganèse solide (-60 kg ) de carburite (65 kg) et d'aluminium.	Laitier : Fe = 20,8 %      CAO = 45,3% Mgo = 4,5%      MnO = 7,6 % SiO <sub>2</sub> = 10,8 %      Al <sub>2</sub> = 0,7 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 3,5%      S = 0,1 %
40		fin de coulée en poche	
47		Versement de la fonte de la coulée suivante.	

Le tableau suivant résume le déroulement chronologique d'une charge L D élaborée dans un convertisseur de 140 t : avec une lance à trois tronsoon peut dégager les résultats suivant :

Tableau III

## BILAN THERMIQUE DE L'AFFINAGE D'UNE FONTE HEMATITE AU CONVERTISSEUR L D ( POUR 1 TONNE DE FONTE)

A C T I F (th)			P A S S I F ( th)	
Enthalpie de la fonte à 1300 ° C			Enthalpie de l'acier à 1600 ° C	
0,266 X 940 Kg de fer =	250,0	} 280,8	0,328 X 910 Kg de Fer =	297,5
0,480 X 40 Kg de C. =	19,2		0,634 X 1 Kg de C. =	0,5
0,745 X 10 Kg de Si =	7,5		0,354 X 1 Kg de Mn =	0,3
0,294 X 3 Kg de Mn =	2,3		0,221 X 0,2 Kg de P =	0,0
0,178 X 1 Kg de P =	1,8			
Oxydations des elets. et formation du laitier			Enthalpie du laitier à 1600 ° C	
2,731 X 39 Kg de C =	106,0	} 233,3	0,134 X 78,4 Kg de chaux =	65,2
7,511 X 10 Kg de Si =	75,1		Inscrit de la chaux	
1,675 X 7 Kg de Mn =	11,7		0,134 X 78,4 Kg de chaux =	10,5
7,64 X 0,8 Kg de P =	6,1		Chaleur sensible des gaz à 1600 ° C	
1,142 X 30 Kg de Fe =	34,4		0,556 X 66,8 Nm <sup>3</sup> de CO =	37,01
combustion des gazs dans le four			0,813 X 7,5 Nm <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> =	6,7
3,02 X 7,5 Nm <sup>3</sup> de CO =	22,6		H <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> O	0,5
2,58 X 0,4 Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> =	1,0		Pertes thermiques	18
TOTAL ACTIF	537,7		TOTAL PASSIF	436,4

Excédent thermiques : 101,3 th correspondant à 300 Kg de ferrailles et 12 kg (mânerai).

14.

HYDRODYNAMIQUE DU JET DE GAZ DANS LA FONTE LIQUIDE :

Le soufflage d'oxygène pur, à vitesse supersonique (vitesse du courant supérieur à la vitesse du son), est effectué généralement au moyen d'un lance refroidie à l'eau (Adiabatique) placée au dessus d'un bain de fonte phosphoreuse liquide.

au point de vue aérodynamique, la partie inférieure de la lance (buse) se caractérise par un jet d'impulsion (débits de quantité de mouvement) élevée, avec une répartition très hétérogène des pressions dynamiques : celles-ci sont fortes dans l'axe du jet, mais diminuent très rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'axe.

Ces caractéristiques se traduisent en pratique par un grand pouvoir pénétrant du jet sur une surface d'impact.

Le paramètre rencontré le plus fréquemment dans l'étude aérodynamique du jet de gaz est le rapport dimensionnel ( $x/d$ ), qui caractérise le rendement en acier :

On définit  $\xi$  comme étant fonction du rapport ( $x/d$ ) soit :

$$\xi = \varphi \frac{(x)}{d} = \frac{V_x}{V_0} = \frac{C_x - C_m}{C_0 - C_m} = \frac{t_x - t_m}{T_0 - t_m}$$

d : Diamètre de la buse

x : la distance entre la buse de la buse et la surface du bain.

$C_i$  : Concentration

$C_m$  : Concentration moyenne

$t_i$  : Température

$V_0$  : Vitesse du gaz juste à la sortie de la buse

V : Vitesse à une distance x de la buse



Au cours des mouvements du bain excité par le jet de gaz, cette valeur de  $\varepsilon$  dépendra non seulement du rapport  $x/d$ , mais aussi du nombre d'Archimède. ce dernier est lié aux densités des deux phases, ainsi que les paramètres dimensionnels de la buse.

$$\varepsilon = \frac{V_x}{V_0} = \varphi' \left( Ar, \frac{X}{D} \right)$$

$$Ar = \frac{\rho_{\text{gaz}} \cdot V_0^2}{(\rho_{\text{ac}} - \rho_{\text{gaz}}) g \cdot d_0}$$

Ar: nombre d'achimèdes

$\rho_i$ : densité des phases

$V_0$ : Vitesse du gaz à la sorti de la buse

g : 9,81 m S- 2

$d_0$  : dimaètre de la buse à la sortie

X : distance entre la buse et le point en question

L'étude aerodynamique du jet de gaz dans le bain d'acier, est caractérisée par une expansion adiabatique totale du gaz dans la buse.

Pour que le procédé d'affinage par l'oxygène soit rentable, on utilise généralement la buse de MAVAL, qui reprend à la condition d'écoulement suivantes :

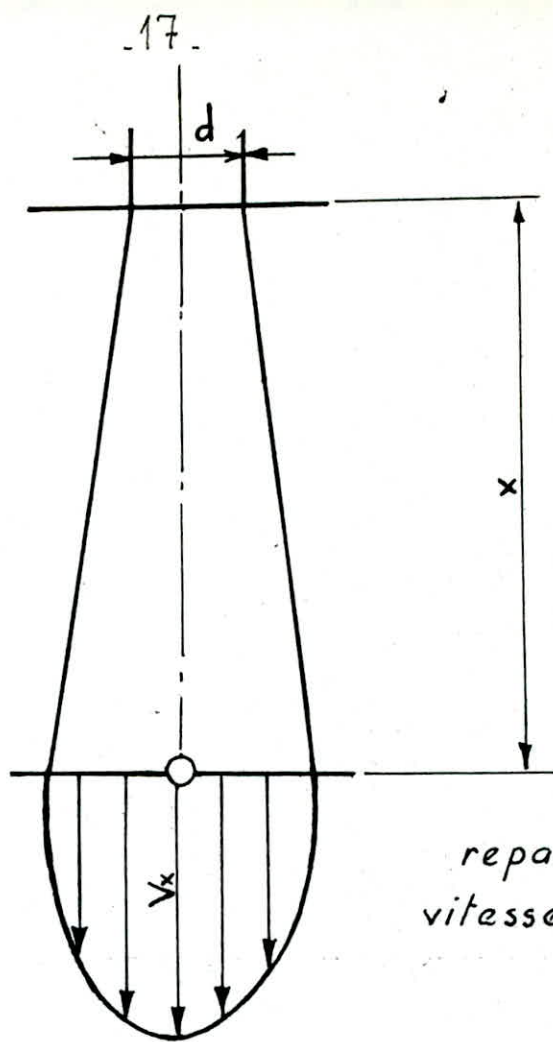
$$M = \frac{V}{c} > 1 \Rightarrow V_0 > c$$

$V_0$  = vitesse du gaz à la sortie de la buse

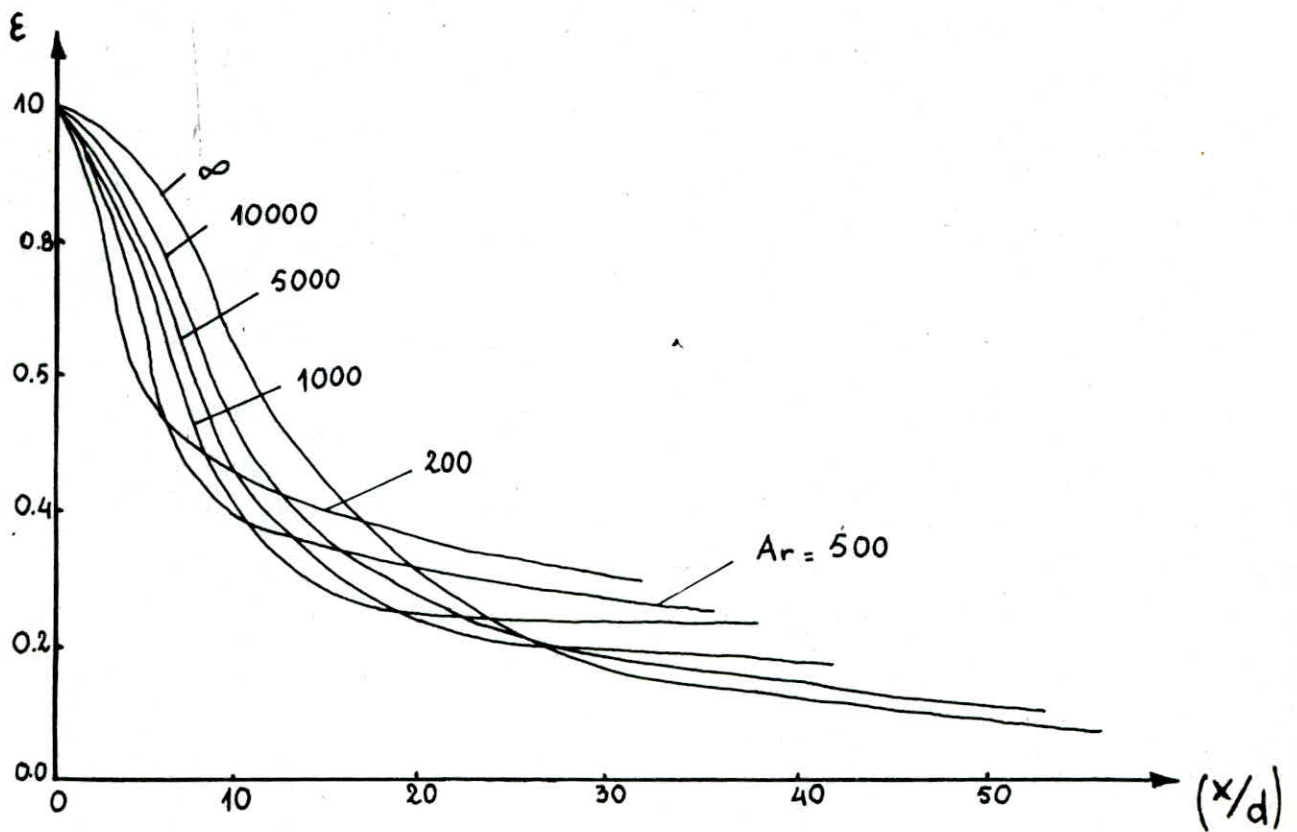
c : vitesse local du son

M : nombre de mach





repartition de la  
vitesse dans le bain.



$$\epsilon = f\left(\frac{x}{d}, Ar\right)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$P_0$  = Pression du gaz à la sortie de la buse

$P$  : pression du gaz au point d'arrêt

$$\gamma = c_p / c_v$$

$$\gamma_{O_2} = 1,4$$

on aurait pu aussi obtenir cette vitesse à partir de l'expression suivantes :

$$\frac{V_x}{V_0} \left( \frac{x}{d} \right)^{1,1} = B = \text{Constante}$$

Dans ce genre de calcul ou relation, on a intérêt à transformer l'équation ci-dessus, pour établir une relation directe entre les pressions et le paramètre  $x/d$ .

Comme  $\frac{P_x}{P_0} = C_{p1} \left( \frac{V_x}{V_0} \right)$

où encore :  $\frac{V_x}{V_0} = C_{p2} \left( \frac{x}{d} \right)$

ou en tire  $\frac{P_x}{P_0} = f \left( \frac{x}{d} \right)$

Etude cinétique du jet de gaz à la sortie de la buse :

Les répartitions des vitesses et des pressions dynamiques d'une couche de courant à la sortie de la buse, tendent asymptotiquement vers la forme cloche, ensuite, cette couche du courant se développe progressivement, alors que la vitesse et la pression dynamique de la partie centrale, non touchée par les frottements de l'air, diminuent pour assurer les conservations du débit ( voir figure) 20)

Il serait possible donc de calculer dans n'importe quel point (X) d'une couche de courant, le diamètre  $\phi_x$  de la couche située à une distance X de la sortie de la buse, ainsi que le rapport  $V_y / V_A$

$$\phi_x = d \left[ \frac{X}{d \cdot B} + 1 \right]$$

d: diamètre à la sortie de la buse

B: constante

$\phi_x$ : le diamètre de la couche du courant à une distance x de la sortie de la buse.

$$\frac{V_y}{V_A} = \left[ 1 - \left( \frac{Y}{X} \right)^3 \right]^2$$

$V_y$ : La vitesse d'un point sur la couche du courant

$V_A$ : La vitesse sur l'axe central du point situé sur la couche en question

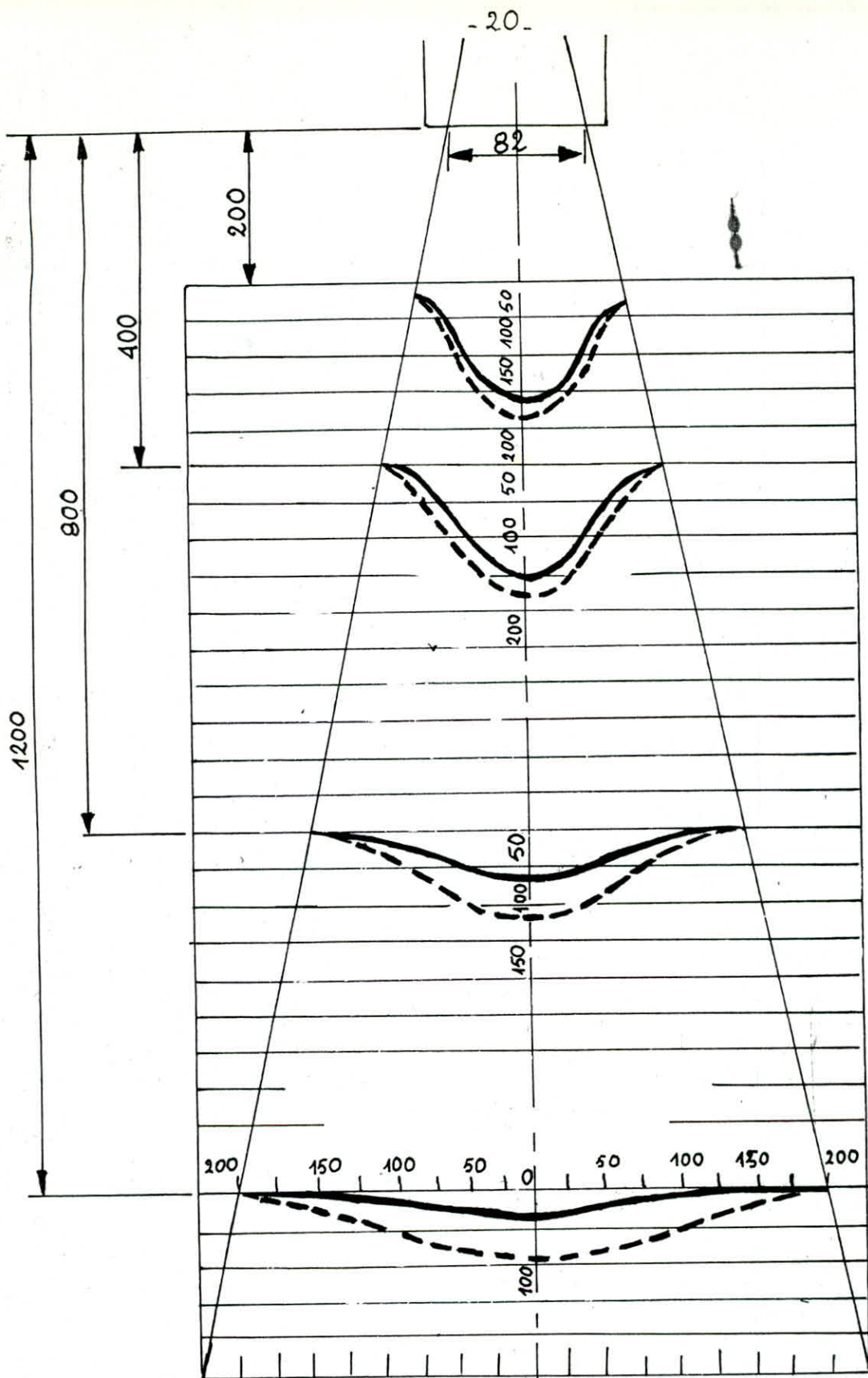
XX : la distance entre la sortie de la buse et la couche du courant.

Y : La distance entre le point en question et l'axe central.

On peut aussi exprimer la vitesse moyenne V d'une couche de courant à l'aide de l'intégrale suivante :

$$V = \frac{2}{r^2} \int_0^r V_y y \, dy$$

r: rayon de la couche du courant.



Profil de pression et de vitesse de jet de gaz dans une buse de 82 mm de  $\phi$ , et  $59 \text{ m}^3/\text{mn}$  (débit)



ETUDE DES INFLUENCES DU JET DE GAZ SUR LA COUCHE DE CONTACTE :

Certaines expériences ont montrées que l'influence du jet de gaz sur la surface du bain est donné en fonction de plusieurs paramètres ( P.V.  $\gamma$  d, ...etc...).

On a vue au paravant la critère d'Archimède , qui regroupe en général la majorité des paramètres entrant en jeu dans cette étude, nous renseigne ainsi ~~que~~ certains problèmes causés par le jet de gaz.

Notons <sup>sur</sup> que le paramètre essentiel dans ce critère est le diamètre à la sortie de la buse ( $d_0$ ) .

$$Ar = \frac{\rho_0 v_0^2}{\rho g \cdot d_0}$$

le nombre d'Archimède à la sortie de la buse  $Ar_0$  etc....

$$Ar_0 = \frac{\rho_0 v_0^2 d_0^2}{g \cdot L^3 \rho}$$

L = distance du divergent.

MACROGRAPHIE DU PROCESSUS

Le developpement de la macrographie des processus de conversion de la fonte à l'oxygène pur s'explique par plusieurs hypothèses.

Dans la collaboration qui s'est établie entre les auteurs de ce processus , Mer IVONCOV G.P a annoncé l'hypothèse suivante : " Il s'établie autour de la couche de contacte un nuage de tension de pulsation importantes, dont laquelle la majorité des réactions d'affinage ont lieu. Ces réactions provoquent la formation d'une mousse à la surface du bain, cette mousse prendra ensuite une partie d'énergie cinétique du soufflage, en engendrant des vibrations suivant la direction qui s'oppose au mouvement du jet de gaz.

Mrer Baptismansky a montré que si la distance  $(10 \frac{1}{2} - 13) d_0$  , alors on aura dans ce cas là des meilleures pulsations , qui s'absorbent totalement par le bain d'acier.

Ces pulsations rejettent les particulents de fonte vers le milieu gazeux ( vers le haut), ces dernières s'oxydants très rapidement dès leur contacte avec l'oxygène , retombent dans le bain sous forme des particules d'aciers affinés.

Si  $X \geq 15 d_o$  le processus ne se produit pas rapidement, car les tensions de pulsations diminuent, la pression dynamique serait faible dans ces là.

Si on augmenterait par la suite cette pression , en faisant varier la hauteur  $X$  dans l'intervalle  $(10 \div 13) D_o$ , on aboutira à une pénétration très profonde dans le bain, et cette hauteur de pénétration on la notera par la lettre (**h**).

Calcul du paramètre h:

La pression dynamique dans le point le plus profond de pénétration est données par la relation fondamentale des pressions.

$$P_h = P_{at} + \bar{\omega} \cdot h \quad h = \frac{P_h - P_{at}}{\bar{\omega}}$$

$P_h$  : Pression dynamique à une profondeur h.

$P_{at}$  : Pression atmosphérique à l'intérieur du convertisseur

$\bar{\omega}$  : Masse spécifique.

$$P_h - P_{at} = \bar{\omega} h \gg P \Rightarrow P_h - P_{at} \geq 0 \Rightarrow P_h \geq P_{at}$$

Calcul de h par les lois de Mer KALAZANCEV I.G.

$$\text{si } \frac{H}{d_o} = 0 \Rightarrow \frac{h}{d_o} = \frac{1}{2} n Ar_o$$

$$\text{si } \frac{H}{d_o} > 0 \Rightarrow h = 0,23 n Ar_x H.$$

$d_o$  = Diamètre de la buse à la sortie

H = distance buse bain

n = coefficientant de changement de la pression dynamique

La valeur de h d'après Mer Baptizmansky sur une modèle à froids est :

$$h = \frac{K \cdot d_o^{0,6} \sqrt{P}}{\rho_{ac}^{0,4} \left( 1 + \frac{H}{d_o B} \right)}$$

$\rho_{ac}$  = Densité d'acier

K = constante

B = coefficientant que depend de la viscosité

Le coefficientant n est fonction du nombre d'Archimède

$$n = f(Ar) \quad n = \frac{2 \rho g h}{\gamma_x V_x^2}$$

si  $Ar > 10 \quad n = \frac{2}{Ar}$

d'après les équations établie au paravant

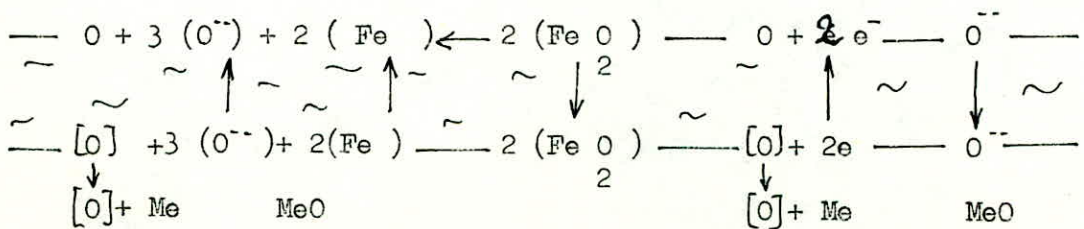
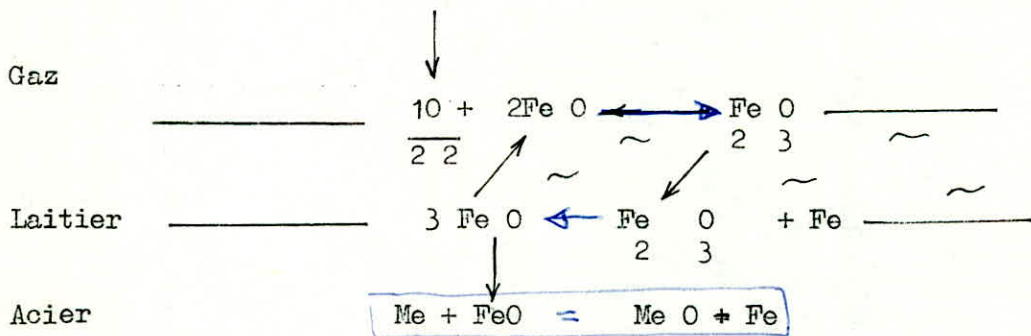
si  $\frac{H}{d_o} = 0 \Rightarrow \frac{h}{d_o} = \sqrt{Ar_o}$

si  $\frac{H}{d_o} > 0 \Rightarrow h = V_x \sqrt{\frac{x}{\infty} d_x}$

si  $\frac{H}{d_o} > 0$  les résultats ne sont pas les mêmes pour différentes méthode

Généralement on trouve :  $h_{exp} \approx h_{th}$

le paramètre R est généralement fonction de plusieurs paramètres (H, n, Ar, V, P,  $\gamma$ , .....).





MARCHE GENERALE DE L'AFFINAGE

L'acier se fabrique surtout à partir de fonte, mais on utilise les chutes de l'industrie sidérurgique et de plus en plus des ferrailles 54,5%.

L'élimination des impurités principales se fait essentiellement par oxygénation, sauf pour le soufre. L'oxygénation a lieu, suivant les procédés, par l'oxygène contenu dans les oxygènes de Fe des minerais ou des ferrailles.

Le carbone, le silicium et le manganèse sont donc éliminés par la simple oxydation, sensible seulement en milieu réducteur.

L'élaboration de l'acier comporte donc deux phases essentielles successives ; oxydation et réduction ;

la phase d'oxydation permet le départ du carbone, du silicium, du manganèse, du phosphore et d'une partie du soufre. Le fer même est oxydé en partie, et le bain renferme de l'oxyde de fer, la scorie en contient également ( $Fe_2O_3$  et surtout  $FeO$ ) ; ce qui entraîne une perte de métal.

La phase de réduction permet le départ du soufre, et la désoxygénation de l'oxyde ferreux restant à la fin de la phase précédente.

Affinité de l'oxygène pour les éléments à éliminer.

Cette affinité est mesurée par la variation de l'enthalpie libre  $DG^0$  de formation des oxydes à partir d'une mole d'oxygène comme l'indique le tableau ci-dessous.

REACTIONS	$DG^0 = DH^0 - TD S^0$
$Si + O_2 \longrightarrow Si O_2$	- 208300 + 43,30 T
$\frac{4}{5} P + O_2 \longrightarrow \frac{2}{5} P_2 O_5$	- 148000 + 49,37 T
$2 Mn + O_2 \longrightarrow 2 Mn O$	- 184.000 + 34,63 T
$2 Fe + O_2 \longrightarrow 2 Fe O$	- 124.100 + 29,90 T
$2 C + O_2 \longrightarrow 2 CO$	- 534.00 - 41,9 T

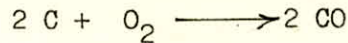


Les opérations d'affinage

1/ Décarburation

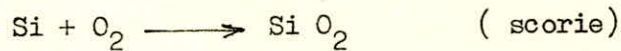
Le carbone existe dans la fonte à l'état de solution, sa teneur varie de 2,5 à 5 %

Le Carbone s'élimine à l'état de dioxyde de carbone  $CO_2$  et surtout d'oxyde de carbone  $CO$ , le départ de ces gaz est évidemment facile.



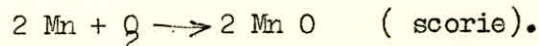
2/ Désilication Désiliciation

Le silicium brûle à l'état de silice  $Si O_2$  ; cet anhydride qui correspond à un acide fort non isolé, se combine aux oxydes basiques présents  $MnO$ , ( et  $CaO$  s'il y a lieu ) en donnant une scorie liquide qui, du fait de sa faible masse volumique monte à la surface du bain.



3/ Démanganésation :

Le manganèse brûle à l'état d'oxyde manganéux  $MnO$ , oxyde basique qui se combine à l'anhydride silicique.



4/ Déphosphoration

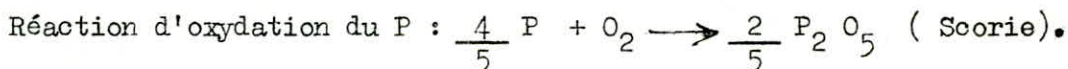
Le phosphore s'oxyde en donnant l'anhydride phosphorique  $P_2 O_5$ , mais aux températures élevées réalisées au cours de l'élaboration de l'acier, on sait que cet oxyde est réduit par le carbone?

L'élimination du phosphore ne semble donc pouvoir se faire qu'après décarburation totale du bain, décarburation qui ne peut être réalisée sans oxydation importante de l'acier, entraînant un déchet inadmissible.

Mais les phosphates sont plus difficiles à réduire par le carbone que l'anhydride phosphorique ; aussi, pour éliminer le phosphore, opéré t'on en présence d'une base forte, la chaux, qui fixe l'anhydride phosphorique, sous forme de phosphate neutre qui passe dans la scorie. si l'on admet que l'oxygène se trouve sous forme  $FeO$ , la réaction (reversible) s'écrit :



Une dephosphoration poussée exige donc un milieu à la fois très oxydant (abondance d'oxyde ferreux) et très basique? Le milieu peut être d'autant moins oxydant que la scorie est plus basique; cette conséquence de la loi de l'équilibre est bien vérifiée par l'expérience.



#### 5/ Désulfuration :

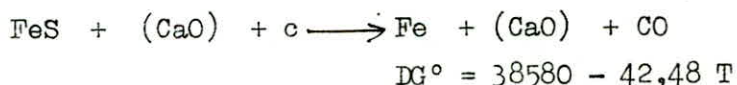
l'oxydation du soufre ne peut guère avoir lieu, car la réaction d'oxydation :



est très endothermique, et aux températures atteintes dans l'affinage de la fonte, c'est plutôt la réaction inverse qui tend à se produire. l'élimination du soufre se fait principalement par la réaction déjà rencontrée au haut fourneau :



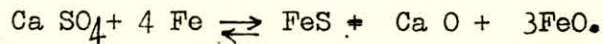
L'étude statique de cet équilibre montre que la désulfuration est facilitée par l'accroissement de la teneur en chaux du laitier, par la réduction de l'oxyde ferreux et par l'élévation de température qui favorise la réaction endothermique.



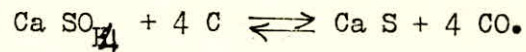
L'équilibre n'est jamais atteint hors de la coulée, car la vitesse de réaction reste toujours trop lente ; on cherche à l'accroître en élevant la température du bain, et si l'élévation de température ne suffit pas, en augmentant sa fluidité par l'addition éventuellement de spath - fluor (ou fluorine Ca F<sub>2</sub>); en résumé , une désulfuration poussée nécessite une température élevée et un milieu basique, et très réducteur. La désulfuration s'accroît aussi avec la teneur en manganèse.

Ce qui s'explique par une réaction analogue à la précédente et surtout par la grande solubilité de  $MnS$  (très supérieur à celle de  $FeS$ ) dans la scorie.

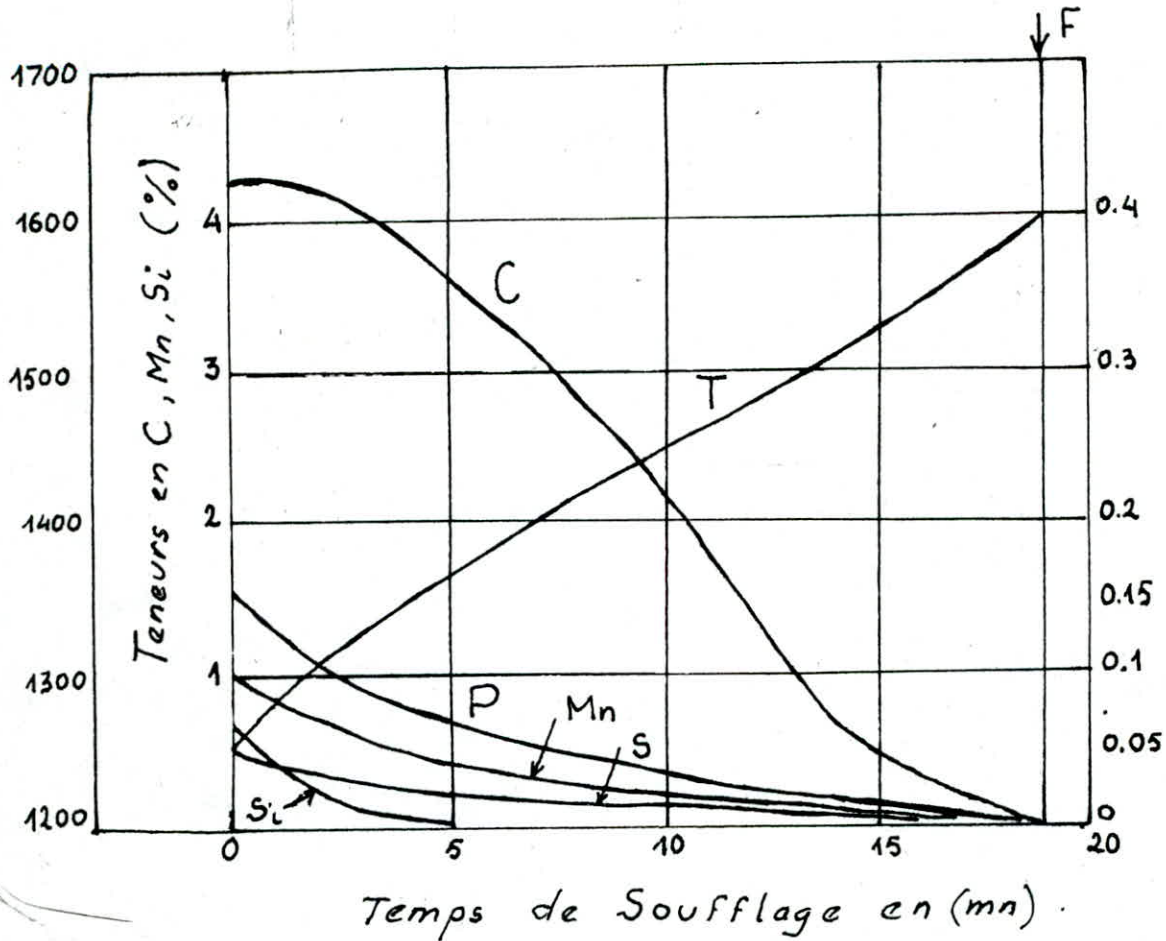
De plus, l'atmosphère qui surmonte le bain ne doit pas être oxydante, sinon  $CaS$  est oxydé en sulfate qui est réduit par le métal qui se combine alors au soufre, régénérant ainsi le soufre.



Le sulfate de calcium peut être aussi réduit par le carbone :



Les diverses impuretés s'éliminant par oxydation, on conçoit que le haut fourneau ne puisse livrer qu'un produit très impure; le milieu y étant essentiellement réducteur, on ne peut obtenir une faible teneur qu'en soufre.



F → Fin de Soufflage

T → temperature

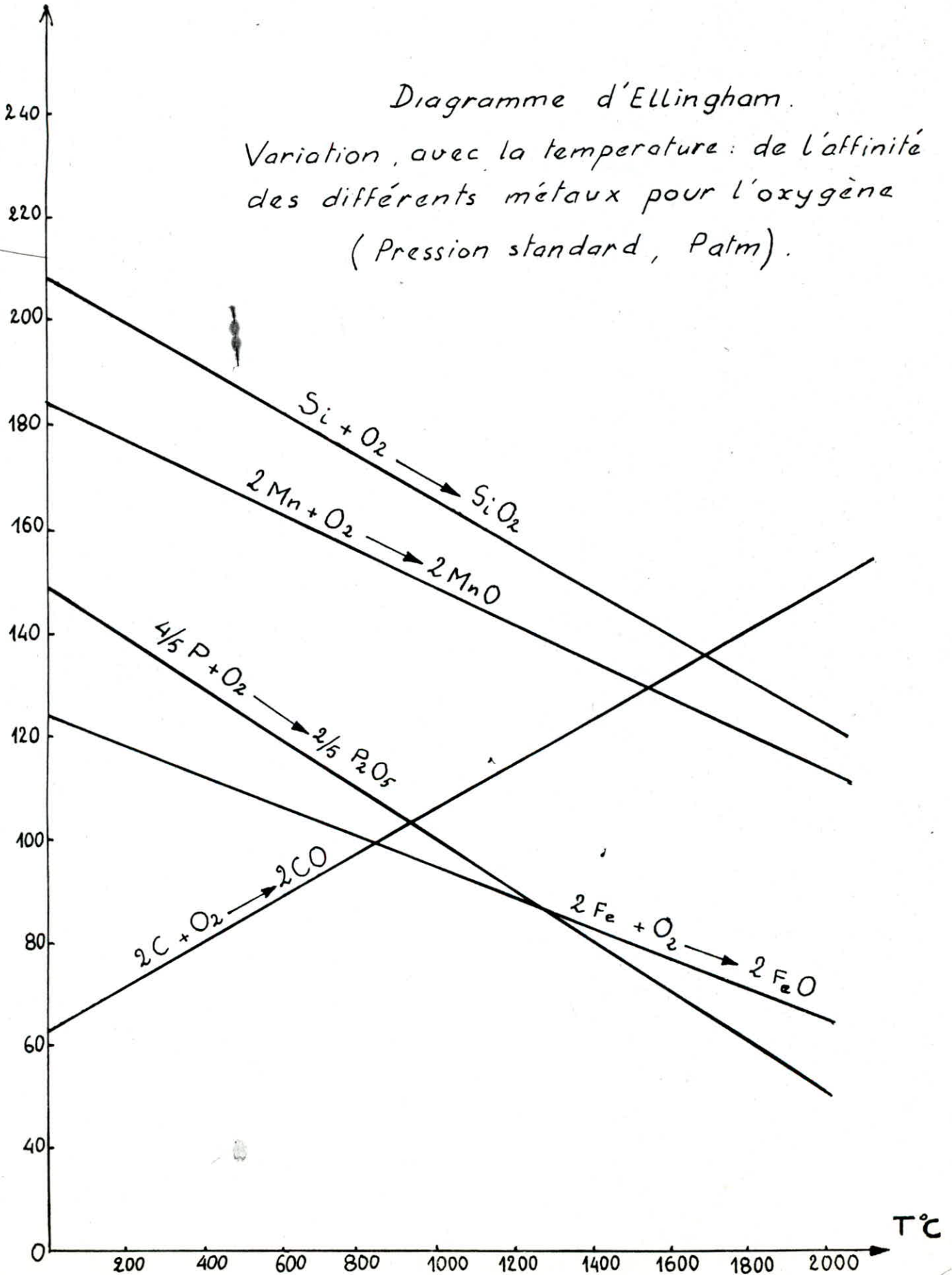
Evolution schématisée des éléments  
en cours d'affinage de Fonte hematite  
au convertisseur L.D



$$A^\circ = -\Delta G^\circ \text{ Kcal}$$

Diagramme d'Ellingham.

Variation, avec la température : de l'affinité des différents métaux pour l'oxygène (Pression standard,  $P_{atm}$ ).



La théorie de changement de concentration dans un volume unitaire

La vitesse de concentration des molécules d'oxygène dans le bain d'acier est donnée par la relation suivante :

$$\frac{dC_j}{dt} = \text{div} (V, C_j) - \text{div} D \text{ grad } C_j \quad (1)$$

V = vitesse de molécules d'oxygène

C<sub>j</sub> = concentration de l'oxygène

D = coefficient de diffusion

Cette variation est essentiellement due à l'effet de convection dans la couche de diffusion.

Rappelons que la convection est causée par une variation de la température dans une couche, provoquant ainsi une variation de concentration assez importante.

En négligeant l'effet de diffusion l'équation (1) devient donc :

$$\text{puisque} \quad \text{div} (V, C_j) \gg \text{div} D \text{ grad } C_j$$

Alors :

$$\frac{dC_j}{dt} = \text{div} (V, C_j)$$

Etude de transfert de matière et de chaleur dans un système hydrodynamique

Dans un système hétérogène, la diffusion unilatérale d'après la loi de Fick I est de la forme

$$W = \frac{dm}{dt} = -D.A. \text{ grad } C$$

M = masse de molécules d'oxygène diffusés :

W = Vitesse de diffusion

A = Surface à travers laquelle les molécules d'oxygène diffusent

D = Coefficient de diffusion.

Il y a aussi d'autres formules concernant le transfert de matière dans un bain liquide.

$$W = -D.A. \frac{\Delta C}{\delta} = -A.B. \Delta C.$$

avec  $\beta = \frac{D}{\delta} =$  Nombre de transfert de matière

$\Delta C =$  variation de concentration

$$S_N = K \cdot Re^{-x} Sc^{-y}$$

$x, y$  sont des constantes  
dependants du type d'écoulement.

Un calcul approximatif de la valeur  $\beta$  a été établi par Me OETERS qui a montré que cette valeur depend du type d'écoulement.

a/ écoulement laminaire

$$\beta = \frac{1}{\pi} \frac{D}{y} \sqrt{Re Sc}$$

Re = nombre de reynolds

Sc = nombre de Schimdt

y = épaisseur de la couche de diffusion

b/ Ecoulement transitoir :

$$\beta = \frac{1}{3} \frac{D}{y} \sqrt{Re Sc}$$

c/ écoulement turbulent

$$\beta = 0,04 \frac{D}{y} Re^{9/10} Sc^{1/3}$$

Re =  $\frac{Vl}{D}$  = nombre de reynolds

Sc =  $\frac{D}{D}$  = Nombre de Schimdt

Sh =  $\frac{1}{S_n} = \frac{B.l}{D}$  = nombre de Sherwood

~~de vitesse~~

$\nu$  = viscosité cinématique

$S_N$  = épaisseur de la couche de diffusion

$$S_N = K \cdot Re^{-x} Se^{-y}$$

La valeur de  $\beta$  diminue à partir du point d'incidence ( point de contact).



Calcul de  $\bar{\beta}$  :

$$(*) \quad \bar{\beta} = \frac{1}{l} \int_0^l B(y) dy$$

On pourrait appliquer préalablement la formule (\*), si on veut déterminer la moy<sup>e</sup>enne de la constante du transfert de matière à une profondeur l.

Si le mouvement est turbulent on a :

$$\bar{\beta} = \approx 1,1 \beta_1$$

$\beta_1$  = nombre de transfert de matière à une distance l .

L'évolution des courbes de transfert de matière et chaleur en fonction du nombre de Reynolds a été étudié par Monsieur HANS LOHE, pendant la fabrication de l'acier dans le convertisseur L.D.

$$Nu' = \frac{\bar{\beta} r}{D} \quad Sc \quad 0,34$$

$$Nu = \frac{\bar{\alpha} r}{\lambda} \quad Pr \quad 0,371$$

Nu, Nu' = nombre de Nusselt

Pr = nombre de Prandtl

$\lambda$  = Conductivité de chaleur

$\bar{\alpha}$  = Coefficient de transfert de chaleur

r = Rayon de la surface du bain

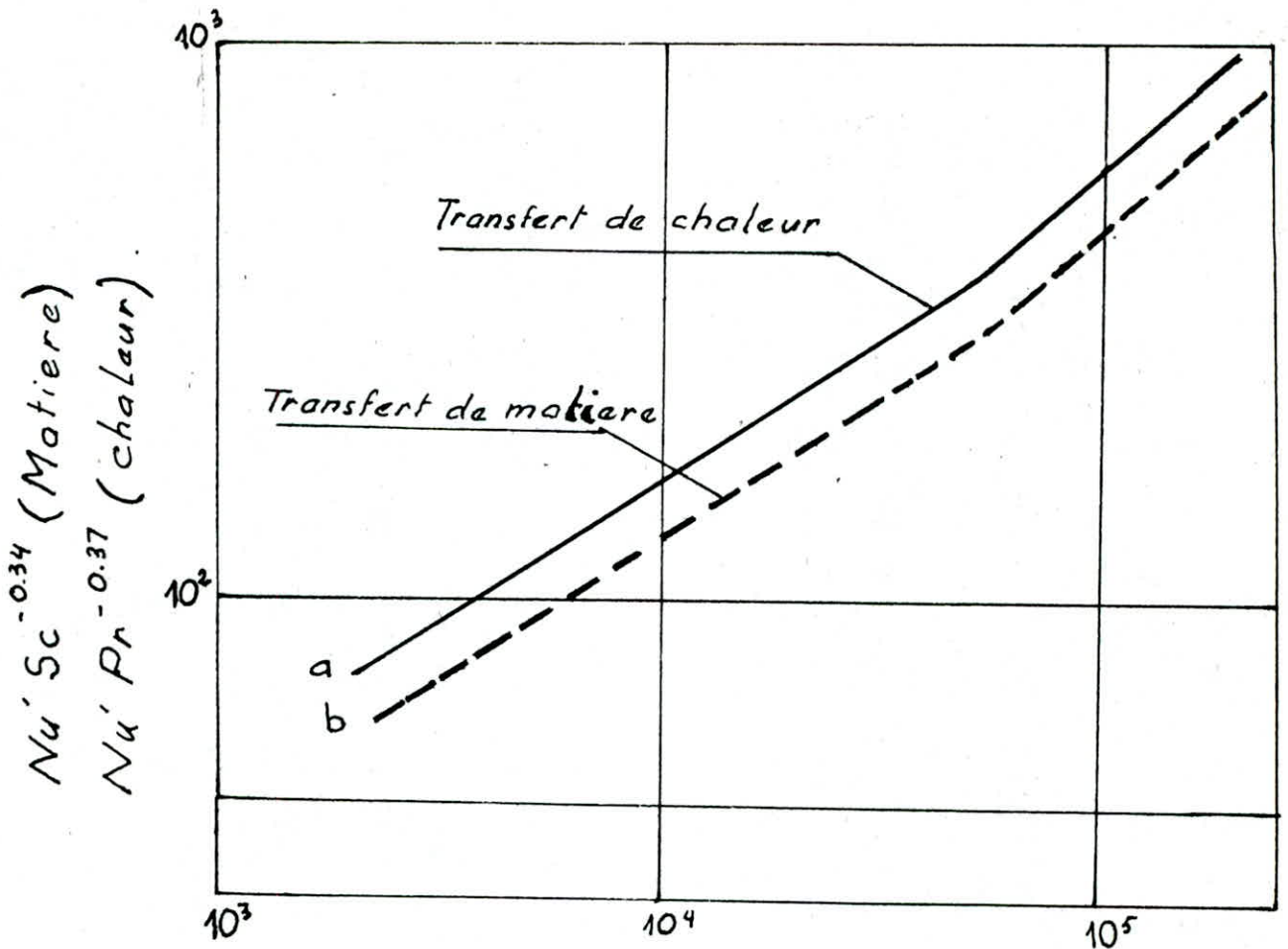
$\bar{\beta}$  = Coefficient de transfert de matière

- Représentation graphique des courbes de transfert :

l'allure des fonctions de transfert ( figure ci-dessous) prend une ligne droite ascendante, dont la première partie de la droite présente le cas d'un mouvement laminaire, tandis que l'autre partie présente le cas d'un mouvement turbulent.

Les conditions analogiques du modèle L.D. :

On ne peut réaliser exactement le modèle L.D c'est pourquoi qu'il faut réduire l'influence des critères analogiques pour le processus (similitude restreinte).



Nombre de Reynolds.

$$a : Nu Pr^{-0.371} = f(Re).$$

$$b : Nu Sc^{-0.34} = f(Re).$$

soit un phénomène physique comportant n variable , dans les dimensions des quelles interviennent des grandeurs fondamentales l'Equation qui regit le phénomène peut se mettre sous la forme :

$$F (Ho, F2, Eu, Re, Ma, \bar{\varphi}, \bar{\chi}, l_1, l_2, \dots, l_n) = 0$$

$\bar{l}_i$  : Paramètre géométrique

$$\bar{l}_i = \frac{L_i}{l}$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\gamma_f - \gamma_a}{\gamma_g} = \frac{\gamma_f}{\gamma_g}$$

$$\bar{d} = \frac{d}{d_g}, \quad \bar{U} = \frac{U}{W}$$

U : vitesse du gaz réduit concernant l'unité de surface du bain.

Dans le cas d'un liquide incompressible , de plus de ce qui a précédé il faut utilisé aussi le critère de Weber.

Ce critère est donné par le rapport entre la tension superficielle et les forces d'inertie.

$$We = \frac{v \cdot \gamma \cdot L^2}{\nu}$$

$\gamma$  : Tension superficielle.

Critère d'Archimède modifié :

$$Ar_m = Fr \frac{1}{\bar{\varphi}} = \frac{v^2}{g \cdot d} \frac{\gamma_g}{\gamma_f}$$

La viscosité du gaz n'a aucune influence sur les processus hydrodynamiques du bain et celle du transfert de matière, même chose pour le liquide (viscosité) , ceci car il y a une trop grande turbulance dans le bain.

Notre processus (modèle) se fait dans un état stationnaire (direction de l'axe) c'est pourquoi on élimine les critères d'Eu et  $H_0$  et notre fonction pourrait se limiter à :

$$t ( Ho, Eu, Re, \dots ) = 0$$

L'analyse des processus de transfert de matière est plus complexe en présence d'un système biphasique (deux phases liq-gaz), pour ce cas il existe une fonction fondamentale.

$$t ( Sh, Fo, Fr, EU, Re, We, \gamma, \bar{v}, U, Ma, \dots; l_n Sc ) = 0$$

$$Sh = \frac{Bl}{D} \quad \text{Critère de Sherwood}$$

$$Fo = \frac{Dt}{D^2} \quad \text{Critère de Fourier}$$

$$Sc \hat{=} \frac{\bar{v}}{D} \quad \text{Critère de Schmidt}$$

Construction du modèle:

Pour la construction du modèle de convertisseur L.D. aérodynamique, nous avons conçus principalement un ensemble de trois éléments en plexiglas à coller l'un à l'autre, pour réaliser le convertisseur modèle qui est représenté sur la figure... L'échelle qu'on a dû choisir pour cela fut le 1/20 d'un convertisseur industrielle se trouvant en Hongrie.

Cet ensemble d'éléments en plexiglas mentionné plus haut est constitué principalement, d'un cylindre de 200 mm de diamètre sur 200 mm de hauteur, sur lequel seront fixés de part et d'autre un cône toujours en plexiglas, dont le calcul dimensionnel se présente comme suit :

D'après la figure 38 on a :

$$l = \sqrt{H^2 + \left( \frac{D-d}{2} \right)^2}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{2h}{D-d} \quad \alpha = \text{Arctang } \frac{2h}{D-d}$$

$$\text{Cos } \alpha = \frac{D}{2R} = R = \frac{D}{2 \text{cos } \alpha}$$

$$R = \frac{D}{2 \text{cos} \left( \frac{2h}{D-d} \right)}$$

$$r = R - l$$

$$D = 2R \cdot \frac{B}{360}$$

$$B = \frac{D \cdot 360}{2R} = \frac{180}{R} D$$



$$B = \frac{\alpha}{n}$$

n = nombre de tranches.

Determination de la hauteur (h) :

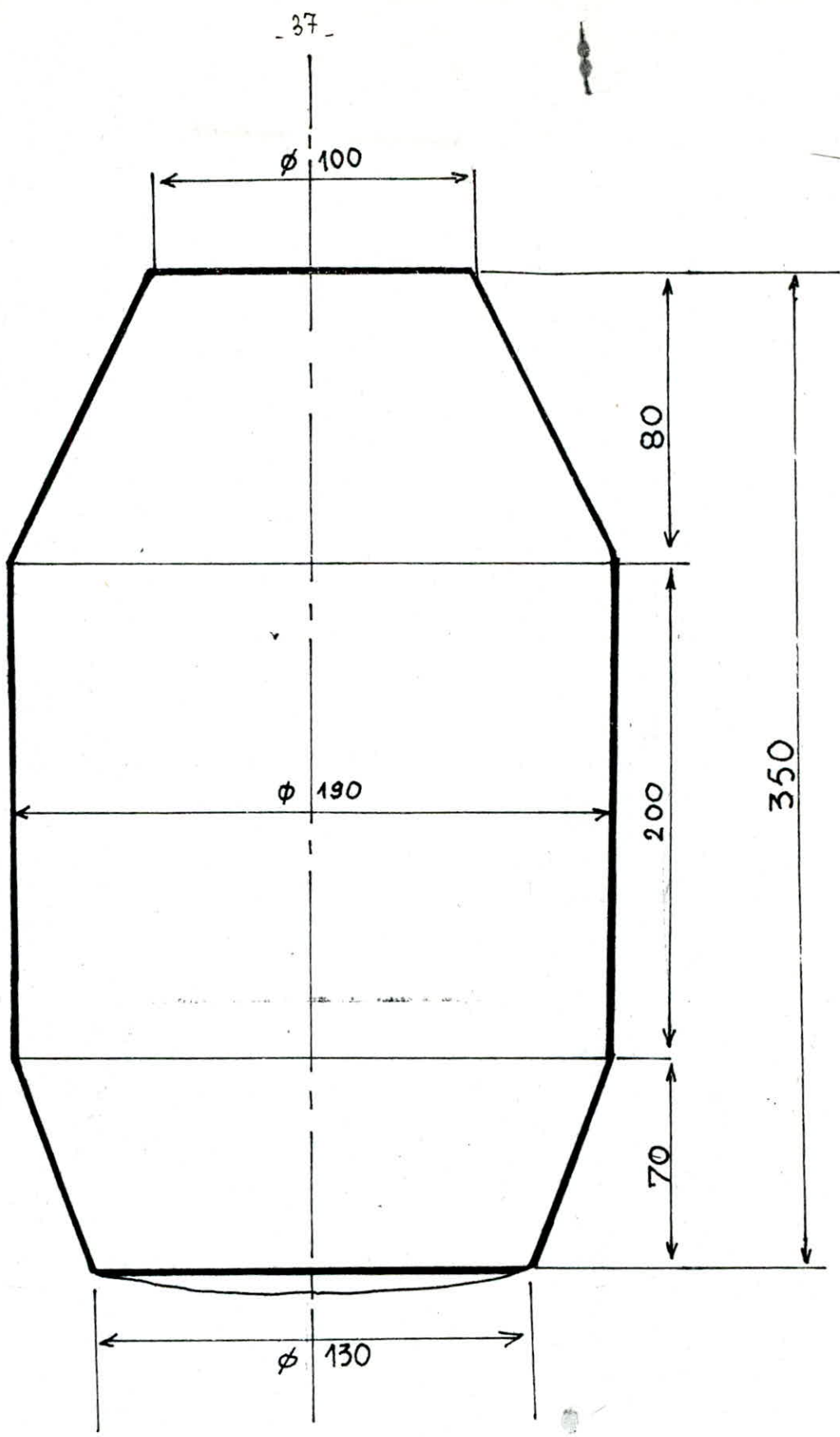
$$h = R - a \operatorname{tg} \alpha$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R - h}{a}$$

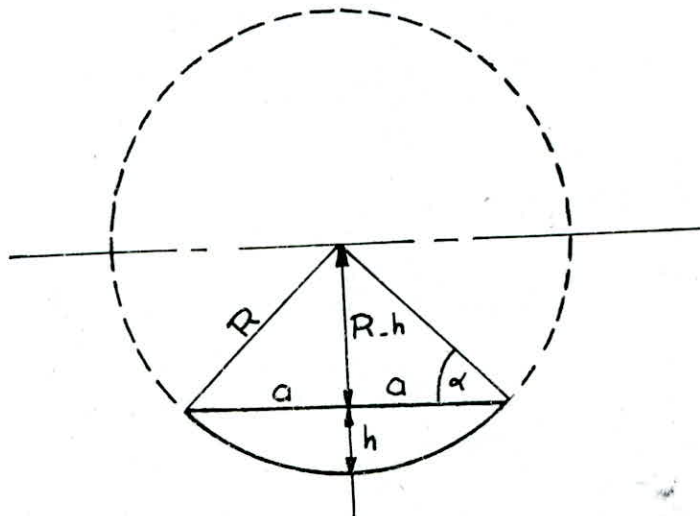
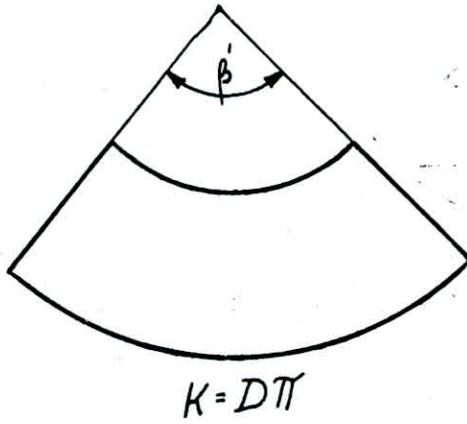
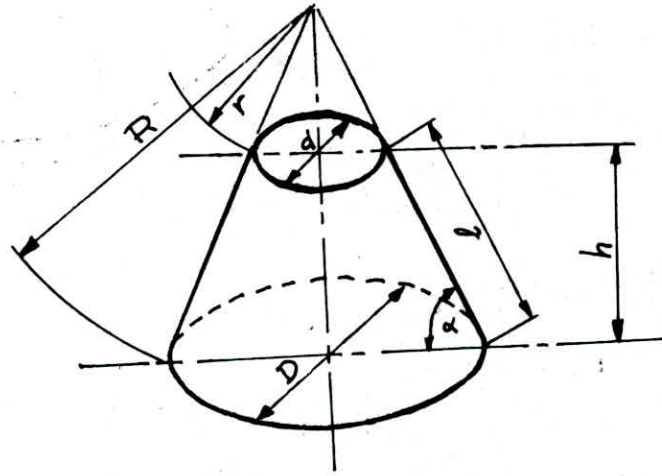
$$\cos \alpha = \frac{a}{R}$$

$$h = R - a \operatorname{tg} \left( \operatorname{Arcos} \frac{a}{R} \right)$$

à noter tout de même que la pièce maitresse de tout convertisseur modèle est la buse d'insufflation bien sûr.



Modele du convertisseur L.D



Dessins aidants aux calculs dimensionnels  
des pieces coniques.

Determination des principaux paramètres de la buse laval à l'aide des lois aérodynamiques/

On appelle l'état générateur celui d'un liquide en un point de l'écoulement où la vitesse est supposée nulle.

On peut en avoir une représentation physique approchée en supposant que l'écoulement est alimenté par un réservoir de grande section dans lequel la vitesse est pratiquement nulle.

Les caractéristiques à l'intérieur de ce réservoir sont alors celles de l'état générateur. Cette ~~px~~ représentation justifiée l'appellation "état générateur".

Cependant, le principal intérêt de l'état générateur est qu'on en retrouve les caractéristiques en un point d'arrêt isentropique. On exprime habituellement la constante du théorème de Barré de Saint Venant à partir de l'état générateur. En appliquant ce théorème entre l'état générateur et le point considéré, on a :

$$\frac{c^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\rho_i}$$

$$\frac{c^2}{2} + C_p T = C_p T_i$$

$$\gamma = C_p / C_v, \text{ températures: } T, T_i$$

Nombre de Mach, classification des écoulements.

$M = C/A$  C désignant la vitesse du fluide au point considéré, et a - la vitesse local du son, c à d la vitesse du son dans le fluide. à la température T du point étudié .

Si  $C < a$ ,  $M < 1$ , l'écoulement est dit subsonique

Si  $C > a$ ,  $M > 1$ , l'écoulement est dit supersonique.

$$a = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

$$r = R/M \quad M = \text{masse molaire.}$$

Compte tenu de cette expression, le théorème de Barré de Saint Venant s'écrit

$$\frac{c^2}{2} + \frac{a^2}{\gamma-1} = \frac{A_i^2}{\gamma-1} \Rightarrow \frac{c^2}{a^2} + \frac{2}{\gamma-1} = \frac{2}{\gamma-1} \cdot \frac{a_i^2}{a^2}$$

Mais comme :

$$a_i = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_i}$$



$$M^2 + \frac{2}{\gamma - 1} = \frac{2}{\gamma - 1} \cdot \frac{T_i}{T}$$

Ce que l'on peut écrire

$$\frac{T_i}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$

C'est une forme générale, valable pour un écoulement adiabatique quelconque.

Pour un écoulement adiabatique isentropique on a aussi

$$1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 = \left( \frac{P_i}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \left( \frac{\rho_i}{\rho} \right)^{\gamma - 1}$$

Les rapports  $T_i / T$ ,  $P_i / P$ ,  $\rho_i / \rho$  sont donnés en fonction de  $M$  dans des tableaux spéciaux.

Pour les applications pratiques on a intérêt à utiliser cette forme du théorème de Barré Saint-Venant, pour établir une relation entre les caractéristiques de deux points 1 et 2 d'un même écoulement.

$$\text{En 1} \quad \frac{T_i}{T_1} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2$$

$$\text{En 2} \quad \frac{T_i}{T_2} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2$$

d'où :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2}$$

expression valable pour un écoulement adiabatique quelconque.

Pour un écoulement isentropique ; on a aussi :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\left( \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2}{2} \right)^{\gamma / \gamma - 1}}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2} \right)^{1 / \gamma - 1}$$

Etat critique :

Le point d'un écoulement, où  $c = a$  (soit  $M_c = 1$ ), est appelé point critique. Les caractéristiques du fluide en ce point dites caractéristiques à l'état critique. On les désigne par l'indice C. On peut les calculer en fonction de celles de l'état générateur, en appliquant les équations précédentes avec  $M_c = 1$

$$\frac{T_i}{T_c} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} = \frac{\gamma + 1}{2}$$

Valeurs numérique pour l'O<sub>2</sub>, avec  $\gamma = 1,405$  :

$$\frac{T_c}{T_i} = \frac{2}{\gamma+1} = 0,8316 \quad (\text{pour un écoulement adiabatique quelconque}).$$

$$\frac{P_c}{P_i} \left( \frac{T_c}{T_i} \right)^{\gamma/\gamma-1} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = 0,5275 \quad \left. \vphantom{\frac{P_c}{P_i}} \right\} \text{Pour un écoulement adiabatique isentropique.}$$

$$\frac{\psi_c}{\psi_i} = \left( \frac{T_c}{T_i} \right)^{1/(\gamma-1)} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} = 0,6343$$

Remarquons que la vitesse critique  $a_c$  dépend uniquement de la température ~~génératrice~~ génératrice.

$$a_c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_c} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} r T_i}$$

Il est donc possible d'exprimer le théorème de Barré de Saint-Venant en introduisant  $a_c$ .

- Caractéristiques au point d'arrêt :

Appliquons le théorème de Barré de Saint-Venant pour la ligne de courant aboutissant au point R.

On obtient :

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_r}{\psi_r} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\psi_i} + \frac{D^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\psi_i}$$

Comme il s'agit d'un gaz parfait, on en déduit que :

$$\frac{P_r}{\psi_r} = \frac{P_i}{\psi_i} \Rightarrow R T_r = r T_i$$

R point d'arrêt

$$\text{d'où } T_r = T_i$$

Dans un écoulement adiabatique quelconque la température d'arrêt est égale à la température génératrice.

Si l'écoulement est adiabatique la relation

$$\frac{P_r}{\psi_r} = \frac{P_i}{\psi_i}$$

entraîne  $P_r = P_i$  et  $\psi_r = \psi_i$ , dans ce cas, toutes les caractéristiques au point d'arrêt isentropique sont les mêmes que celles de l'état générateur. Par contre dans un écoulement adiabatique irréversible  $P_r$  est différent de  $P_i$

Application à l'étude expérimentale des écoulements  
 à une sonde de pression totale est une sonde de pression statique  
 permettent de mesurer P et P<sub>i</sub>

On peut alors calculer le nombre de Mach par la relation

$$\left(\frac{P_i}{P}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$$

La vitesse est donnée par

$$c = M a = M \sqrt{\gamma r \cdot T}$$

Son calcul nécessite donc la connaissance de la température T. Cette température n'est pas mesurable directement : un thermomètre perturbe l'écoulement et indique une température intermédiaire entre T<sub>i</sub> et T. Pour mesurer T il faut disposer d'un thermomètre se déplaçant à la même vitesse que le gaz. On emploie une sonde spéciale, provoquant un arrêt adiabatique, dans laquelle on mesure T<sub>i</sub> à l'aide d'un thermocouple.

On peut alors calculer T par :

$$\frac{T}{T_i} = \left(\frac{P}{P_i}\right)^{\gamma-1/\gamma}$$

On en déduira plus simplement la vitesse par

$$\frac{c^2}{2} = C_p (T_i - T) = C_p T_i \left(1 - \frac{T}{T_i}\right)$$

$$\frac{c^2}{2} = C_p T_i \left[1 - \left(\frac{P}{P_i}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

d'où 
$$c = \sqrt{2 C_p T_i \left[1 - \left(\frac{P}{P_i}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]}$$

ou 
$$c = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\rho_i} \left[1 - \left(\frac{P}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

donnant la vitesse en fonction de la pression quand on connaît les caractéristiques génératrices.

Existence d'une vitesse limitée :

soit un écoulement où la détente pourrait être poussée jusqu'à P = 0 en ce point, la vitesse serait

$$c_2^2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\rho_i}} = \sqrt{2 C_p T_i} = a_i \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} = 2,22 A_i \text{ pour } O_2$$



Pour un gaz donné la vitesse limite obtenue dépend donc uniquement de la température de l'état générateur.

On peut donc écrire le théorème de Barré de Saint-Venant sous la forme

$$\frac{c^2}{2} + c_p T = c_p T_i = \frac{c_i^2}{2}$$

Soit :  $T_i = 15^\circ \text{C} = 288^\circ \text{K}$ .

Pour l'air  $c_p = 1000 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} (\text{d}^\circ)^{-1}$

$$c_l = \sqrt{2000 \times 288} = 759 \text{ m/s Vitesse limite}$$

On notera que cette limite, faisant abstraction des phénomènes physiques est essentiellement théorique. au point  $p = 0$ , on a aussi  $T = 0$ . Il se produirait donc une liquéfaction de l'air dans l'écoulement et les formules appliquées, valables pour les gaz parfaits, ne conviendraient plus dans ce domaine.

#### Influence de la masse molaire

la vitesse peut s'écrire :

$$c_l = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{M} T_i}$$

R étant la constante universelle pour une kilomole de gaz parfait et M la masse molaire

Cette expression montre que, pour obtenir une vitesse élevée, on a intérêt à utiliser un gaz de faible masse molaire. Les applications pratiques sont nombreuses (utilisation de l'hydrogène comme combustible dans les fusées, emplois des canons à hydrogène ou à hélium pour des essais à nombre de Mach élevé dans les laboratoires).



- Application des lois aerodynamiques pour la réalisation de la base laval.

La vitesse d'une particule de gaz à l'entrée d'un convergent ou d'un divergent est :

$$V_0 = \sqrt{\gamma \cdot r \cdot T_0} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0}}$$

R = Constante des gaz parfaits

M = masse molaire du gaz.

A : étant la section à l'intérieur de la base, elle est définie par la relation suivante :

$$A = \frac{m}{\rho V} = \frac{\rho^+ V^+}{\rho V} \cdot A^+$$

M : quantité de masse par unité de temps

$\rho$  : densité

V : vitesse du courant dans la section A.

$V^+$  : vitesse limitée.

$A^+$  : section limitée.

$\rho^+$  : Densité limitée.

$$A^+ = \frac{m}{\rho^+ V^+}$$

$$A^+ = \pi (R^+)^2 = \frac{\pi d_+^2}{4} \Rightarrow d_0 = \sqrt{\frac{4 A^+}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 A}{\pi}}$$

ET comme :  $V^+ = V_0 \sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma-1}}$

Alors :  $\frac{A}{A^+} = \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[ \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$

$P_0$  = Pression à la sortie de la base.

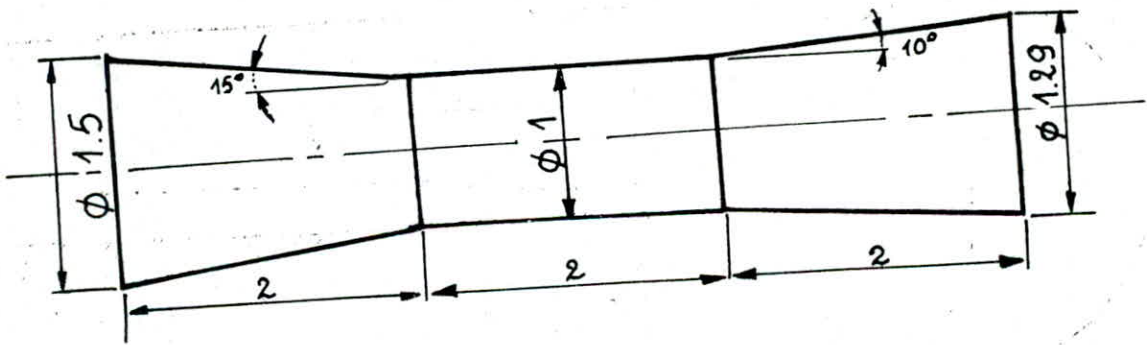
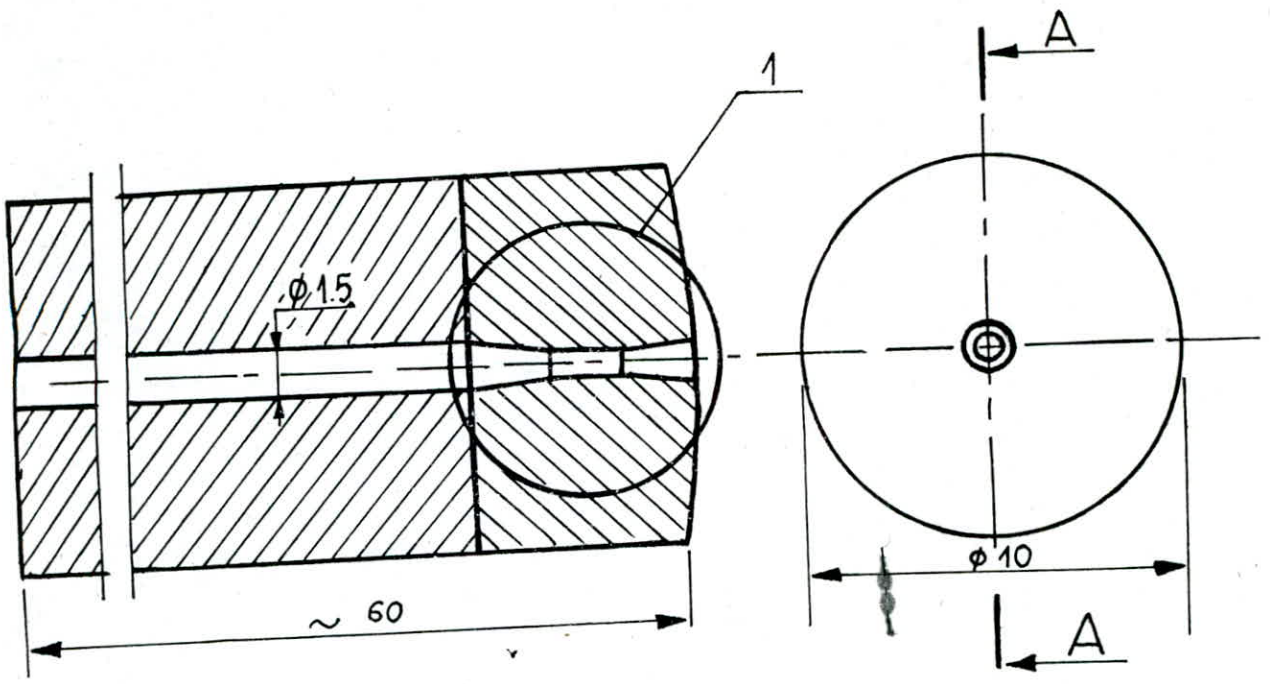
$P$  = Pression au point d'arrêt ( Point de contact ).

On peut définir à l'aide de ces données l'angle ( $\alpha$ ) de convergence ou de divergence :

d'où  $\alpha = \arctg \left[ \frac{d \left( L - \sqrt{\frac{A}{A^+}} \right)}{2L} \right]$

$L$  : Longueur de divergent

$d$  : le diamètre à la sortie de la base.



Dimensions de la buse laval (un trou).

4 - Etude des processus hydrodynamique et transfert de matière dans le modèle :

- Etude hydrodynamique.
- Realisation des conditions hydrodynamique.

Examinons le bilan de la matière d'une charge de fonte de 80 tonnes dans une usine d'élaboration.

La composition centésimale des éléments de cette fonte est :

$C = 4 \%$  ;  $Si = 0,8 \%$  ;  $Mn = 1 \%$  ;  $S = 0,025 \%$  ;  $P = 0,2 \%$

Le rendement d'une fonte qui contient  $0,8 \%$  de  $Si$  : est de  $92 \%$  d'après Mer KVIŤKO, M.P.

Et la quantité de chaux pour une charge d'une tonne de fonte : est de  $51 \text{ Kg/tonne}$ .

Dans une charge d'une tonne il y'a  $25,5 \%$  de ferrailles.

Calculons maintenant le bilan de la matière pour  $80 \text{ t}$  de charge :

Pour une tonne de charge, il y'a :  $25,5 \%$  de feraille ==  $74,5 \%$  de fonte.

Donc pour une charge de  $80 \text{ tonnes}$ , il y'a :

$$80.000 \times 0,745 = 59600 \text{ Kg de fonte.}$$

Quantité de ferrailles .

$$80000 \times 0,255 = 20400 \text{ Kg de ferrailles.}$$



Quantité de chaux pour 59600 Kg de fonte .

$$59,6 \times 51 = 3040 \text{ Kg de chaux.}$$

La quantité d'acier produite : ( Rendement = 92 % ).

$$80000 \times 0,92 = 73600 \text{ Kg d'acier.}$$

Quantité de laitier

$$3040 (\text{chaux}) + 8000 (1 - 0,92) = 9440 \text{ Kg de laitier.}$$

Calculant les volumes sachant les densités des matériaux :

$$V = m/\rho \quad , \quad \rho_{\text{acier}} = 7000 \text{ Kg /m}^3 \quad , \quad \rho_{\text{Laitier}} = 3300 \text{ Kg /m}^3$$

$$V_{\text{acier}} = \frac{73600}{7000} = 10,51 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{laitier}} = \frac{9440}{3300} = 2,86 \text{ m}^3$$

Bilan de la matiere dans le modele :

Nous désignons par la suite l'écriture  $\bar{X}$  par les variables physiques dans le modèle.

A la place d'acier nous introduisons dans le modèle, une quantité de solution aqueuse de  $\text{Zn cl}_2$

Calculons les volumes nécessaires des produits dans le modèle :

d'après les dimensions du couvertisseur modèle (échelle 1:20 )

On peut deduire les volumes modelés.

$$\bar{V}_{\text{acier}} = \frac{V_{\text{acier}}}{M_a} = \text{Volume du acier modèle.}$$

$$M_a = \text{echelle} = 20^3$$

$$\bar{V}_{\text{acier}} = \frac{10,51}{(20)^3} = 1,314 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,314 \text{ dm}^3 = 1,314 \text{ l.}$$

$$\bar{V}_{\text{laitier}} = \frac{V_{\text{laitier}}}{M_a} = \text{volume du laitier modèle.}$$

$$\bar{V}_{\text{laitier}} = \frac{V_{\text{laitier}} \cdot M_a}{M_a} = \frac{2,861}{(20)^3} = 0,358 \text{ dm}^3 = 0,358 \text{ l.}$$

Analogie des densités :

On a choisi comme indice de passage du procédé reel au procédé modèle, le rapport des densités telque :

$$\frac{\rho_1}{\bar{\rho}_1} = \frac{\rho}{\bar{\rho}_2} = \dots = \frac{\rho_j}{\bar{\rho}_j} = 3,947.$$

- Bilan de la matière dans le modèle :

a/ Quantité d'acier modèle :

On prend une quantité concentrée à 100 % du Zn cl<sub>2</sub> de densité

$$\bar{\rho} = 1930 \text{ Kg / m}^3$$

Calculons acier (acier modèle Zn cl<sub>2</sub> )

$$\bar{\rho}_{\text{ac}} = \frac{\rho_{\text{ac}}}{3,947} = \frac{7000}{3,947} = 1773 \text{ Kg / m}^3 .$$

Calculons la quantité d'eau qu'il faut ajouter pour avoir une solution aqueuse de densité  $\bar{\rho}_{ac} = 1773 \text{ Kg /m}^3$ .

La concentration de  $\text{Zn cl}_2$  d'une solution aqueuse de densité  $1773 \text{ Kg /m}^3$

$$1930 \longrightarrow 100 \%$$

$$1773 \longrightarrow x$$

$$\Rightarrow x = \frac{1773 \times 100}{1930} = 91,86 \%$$

La masse totale de la solution :

Masse de la solution = Masse de l'eau + Masse de  $\text{Zn cl}_2$  concentré à 100 %.

$$m = \rho \cdot V = 1,314 \times 1773 = 1,930 \cdot x + 1(1 - x)$$

$$\Rightarrow x = 1,72 \text{ Kg de } \text{Zn cl}_2 \text{ concentré à } 100 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Masse d'eau} &= \text{Masse de la solution} - \text{Masse du } \text{Zn cl}_2 \\ &= 1,314 \times 1,773 - 1,72 \end{aligned}$$

$$\text{Masse d'H}_2\text{O} = 0,609 \text{ Kg.}$$

Masse de $\text{Zn cl}_2$	= 1,72 Kg
---------------------------	-----------

Masse d'H <sub>2</sub> O	= 0,609
--------------------------	---------

b/ Quantité de laitier modèle :

Pour le laitier modèle on a choisi un mélange du pétrole et de l'huile.

$$\rho_{\text{huile}} = 912 \text{ Kg /m}^3$$

$$\rho_{\text{Pétrole}} = 800 \text{ Kg /m}^3$$

Calculons  $\bar{\rho}_{\text{laitier}}$

$$\bar{\rho}_{\text{laitier}} = \frac{\rho_{\text{laitier}}}{3,947} = \frac{3300}{3,947} = 836 \text{ Kg / m}^3$$

Le pourcentage de l'huile dans le mélange est :

$$836 = 912x + 800 (1 - x)$$

$$\Rightarrow x = 32,15 \% \text{ d'huile dans le mélange.}$$

d'où

$$100 - 32,15 = 67,85 \% \text{ de pétrole dans le mélange.}$$

$$\text{Le volume de mélange} = 0,358 \text{ dm}^3 = 358 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume d'huile} = 358 \times 0,3215 = 115 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume du pétrole} = 358 - 115 = 243 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volume du pétrole} &= 243 \text{ cm}^3 \\ \text{Volume d'huile} &= 115 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

c/Quantité du gaz modèle :

La densité du gaz modèle  $O_2$  est

$$\bar{\rho}_{O_2} = \frac{\rho_{O_2}}{3,947} = 0,362 \text{ Kg / m}^3 \quad \rho_{O_2} = 1,429 \text{ Kg / m}^3$$

La densité d'oxygène modèle est très faible d'après les calculs, dans ce cas il faut choisir un gaz de densité très faible, soit l'Hélium, Argon, etc;



$$\rho_{\text{He}} = 0,178 \text{ Kg /m}^3 \quad , \quad \rho_{\text{Ar}} = 1,748 \text{ Kg /m}^3$$

Le pourcentage d'Argon dans le mélange gazeux.

$$0,362 = 1,748 x + 0,178 (1 - x)$$

$$\Rightarrow x = 11,78 \% \text{ d'Argon dans le mélange}$$

$$\Rightarrow V = 1000 \times 0,1178 = 117,8 \text{ dm}^3$$

Volume d'Helium dans le mélange :

$$\% \text{ He} = 100 - 11,78 = 88,22 \%$$

$$\Rightarrow V = 1000 \times 0,8822 = 882,2 \text{ dm}^3$$

Volume d'He = 882,2 dm <sup>3</sup>
-------------------------------------

Volume d'Ar = 117,8 dm <sup>3</sup>
-------------------------------------

Interpretation des resultats et etude comparatine.

Pratiquement, les forces de pesanteur sont toujours negligeables pour un gaz compressible.

Pour obtenir une similitude complete, il faudrait donc tenir compte des forces de pression, de viscosite et d'inertie, c'est a dire realiser l'egalite du nombre de Reynolds, du nombre de Mach, et de  $\lambda$  pour les convertisseurs (modele et reel).

Si on opere dans le gaz ~~et a la meme temperature~~  $\bar{V}_{son} = V_{son}$

la condition de Mach impose  $\bar{V}_0 = V_0$

pour cela, on utilise un rotametre qui nous indique la valeur du debit, et par consequent la vitesse du gaz  $V_0$

$Q = S_0 V_0 = S_1 V_1 = \dots \dots \dots S_n V_n = C^{to}$  pour un debit constant

$\Rightarrow V_0 = \frac{Q}{S_0}$  et comme  $S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$   
 $\Rightarrow V_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2}$

Si  $\bar{L} \neq L$  on ne peut satisfaire a la condition de Reynolds,

$\frac{\bar{V}\bar{L}}{\bar{\nu}} = \frac{V.L}{\nu}$  qu'on agissant sur  $\bar{\nu}$

Il faut alors que  $\frac{\bar{L}}{\bar{\nu}} = \frac{L}{\nu}$

mais :  $\frac{L}{\bar{L}} = \frac{\bar{\nu}}{\nu} = \frac{\eta}{\bar{\eta}} \cdot \frac{\bar{\varphi}}{\varphi} = \frac{\bar{P}}{P}$

$\eta$  = viscosite dynamique.

$\bar{L}$  étant ce lui du modèle,  $\bar{L} < L_2$  ce qui entraîne  $\bar{P} > P$ , il faudra opérer à une pression plus grande pour le modèle.

Ce procédé présente l'inconvénient de nécessiter une pression plus grande pour l'essai du modèle.

Pour réduire la pression nécessaire, on emploie quelquefois des souffleries à gaz raréfié, mais d'après les calculs, ces souffleries présentent l'inconvénient de diminuer le nombre de Reynolds :

$$Re_i = \frac{V L}{\nu}$$

$$i = 10, 15, 20 \quad i = \frac{H}{d}$$

$$\nu_{O_2} = 13,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{\nu} = 54,526 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$V_{10} = \bar{V}_{10} = 195,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad \bar{V}_{15} = 124,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad \bar{V}_{20} = 91,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

	Re <sub>10</sub>	Re <sub>15</sub>	Re <sub>20</sub>
Reel	$3,71 \cdot 10^{+6}$	$3,54 \cdot 10^{+6}$	$3,46 \cdot 10^{+6}$
Modèle	$4,65 \cdot 10^{+4}$	$4,47 \cdot 10^{+4}$	$4,34 \cdot 10^{+4}$

Le nombre Re dans le modèle a diminué, mais  $Re > 3 \cdot 10^4$

(Régime turbulent dans les deux cas), alors on peut admettre dans ce cas la similitude.

Appliquons le critéré d'Archimède modifié :

$$Ar_m = \frac{V^2 \cdot \rho_g}{g \cdot d_o \cdot \rho_f}$$

$$\rho_f = \text{Densité d'emulsion} = 6180 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\bar{\rho}_f = \text{Densité d'emulsion concernant le modele} = 1566 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_g = 1,429 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{pour l'oxygène}).$$

$$\bar{\rho}_g = 0,362 \cdot (\text{emulsion de He - Ar}).$$

$$\bar{V}_{10} = V_{10} = 195 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1}$$

$$\bar{V}_{15} = V_{15} = 126 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1}$$

$$V_{20} = \bar{V}_{20} = 91,32 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1}$$

Tableau des valeurs :

	$Ar_m 10$	$Ar_m 15$	$Ar_m 20$
Conver - reel	34,95	14,18	7,62
Conver - modele	707	290	154

Ce critéré ne confirme pas l'analogie de point de vue numérique, mais l'analogie existe car le rapport est égal à 20 - Or :

$$\bar{Ar}_m / Ar_m = 20 \quad (\text{Rapport de similitude géométrique}).$$



Hauteur de penetration :

$$h = \sqrt{Ar_m} \cdot d X_1 \quad ; \quad d X_1 = d \left( \frac{X_1}{B \cdot d} + 1 \right)$$

$dX_1$  : Diametre de la surface de contact.

$B \approx 40$

$d$  : Diametre de la base.

	$h_{10}$	$h_{15}$	$h_{20}$
Convertisseur réel	398 mm	329 mm	295 mm
Convertisseur modèle	48.81 mm	39,87 mm	35,63 mm

Interprétation

Résultats admissible, mais restent à justifier en pratique.

- Critéro de Weber :

$$W_o = \frac{\gamma \cdot v^2 \cdot l}{\sigma}$$

$$\sigma = 1,314 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\bar{\sigma} = 59,12 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

	$W_{10}$	$W_{15}$	$W_{20}$
Convertisseur réel	$9,3569 \cdot 10^6$	$3,7969 \cdot 10^6$	$2,0355 \cdot 10^6$
Convertisseur modèle	$7,6973 \cdot 10^6$	$3,1539 \cdot 10^6$	$1,6749 \cdot 10^6$

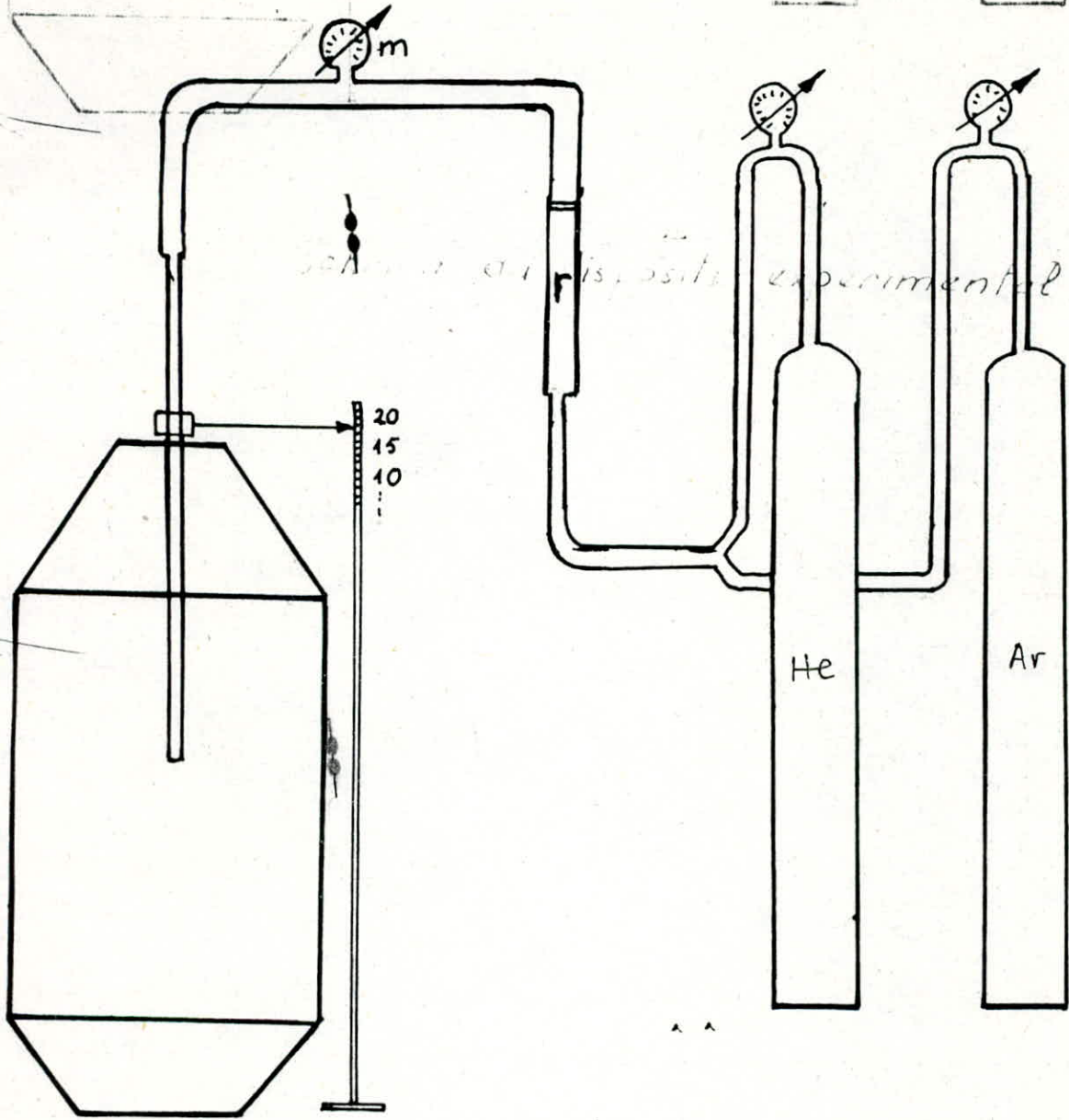


Schéma du dispositif expérimental

## CONCLUSION

Notre modele a ete justifie par certains criteres ,et non par d'autres et cette non justification est due exclusivement a la difference des t temperatures

En effet, le modele fonctionne a basse temperature ( $5-20^{\circ}\text{c}$ ) tandis qu'a l'usine le fonctionnement se manifeste a une temperature tres elevee ( 1300 c)

OR, dans certaine mesure l'analogie est acceptable, car on peut voir a travers le modele ( proie transparente) le meme phenomene du jet de gaz que celui de l'usine ;

NOTON<sup>en fin</sup> en effet que notre etude a ete basee surtout sur l'aspect theorique ,et les resultats acquis , et qui sont justifies du point de vue analog ique restant a justifier en pratique;.





